

# Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración.

JORGE ALBERTO HENRIQUEZ NOVOA

WUEMDELL JAVIER MARTINEZ RODRIGUEZ



UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC

PREGRADO EN INGENIERIA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

ABRIL DEL 2019

## **Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración.**

JORGE ALBERTO HENRIQUEZ NOVOA

WUEMDELL JAVIER MARTINEZ RODRIGUEZ

Trabajo de grado para obtener el título de Pre-grado en ingeniería

TUTOR: Ph.D (c). JAVIER JIMENEZ

CO-TUTOR: Mg. JORGE CARDENAS

UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y  
ELECTRÓNICA

PRE-GRADO EN INGENIERÍA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

ABRIL DEL 2019

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma de jurado

---

Firma de jurado

Barranquilla, 22 de abril 2019

### Resumen

Los sistemas de control establecen una parte importante en los procesos industriales modernos, donde se utilizan, para ajustar variables. Esta etapa sirve para prevenir fallas, capaces de paralizar la planta durante largos periodos de tiempo. Para aplicar un debido control se debe conocer el comportamiento dinámico del proceso. En los sistemas integrantes esto conlleva a una serie de ecuaciones diferenciales de alto grado. El presente trabajo propone una metodología que permita la caracterización de un sistema integrante de manera práctica, luego implementar un diseño de control óptimo. Para la identificación del sistema se propone un método que consta de dos etapas una identificación derivativa, y un método de caracterización de sistemas autorregulados para obtener los parámetros necesarios y así obtener la función de transferencia del sistema, luego de los resultados se implementó un diseño de control, para aplicarlo se utilizaron diferentes métodos de sintonización los cuales fueron los métodos de Ziegler Nichols, Coheen Coob y Lambda, y así hallar los parámetros de ganancias del sistema. Teniendo en cuenta lo anterior se realizaron pruebas de comparación entre los diferentes métodos utilizados y se obtuvo como resultado que el mejor método fue el de derivar la señal y aplicar el método de caracterización de Smith, luego de hallar la dinámica del proceso se aplicaron los diferentes métodos de sintonización, se compararon y se obtuvo como resultado que el método más eficiente fue la sintonización de Ziegler Nichols para un controlador PD, ya que la señal se estabiliza en menor tiempo y no presenta casi amortiguamiento, Para validar las pruebas se realizaron comparaciones con un método teórico y con un equipo que permite modelar un Motor DC real.

**Palabras claves:** Sistema integrante, Controlador, Controlador PD, Métodos de sintonización, Métodos de caracterización, Tiempo muerto, Primer orden

### Abstract

Control systems determine an important part in modern industrial processes, where they are used, to adjust variables. These stages are useful to prevent failures, capable of paralyzing the plant for long periods of time. To apply adequate control, the dynamic behavior of the process must be known. In the integrating systems this leads to a series of high-grade differential equations. The present task proposes a methodology that allows the characterization of an integral system in a practical way, then to implement an optimal control design. For the identification of the system, a method consisting of two stages, a derivative identification, and a method of characterization of self-regulated systems are proposed to obtain the necessary parameters and thus obtain the system transfer function, After the results, a control design was implemented, to apply it, different tuning methods were used, which were the methods of Ziegler Nichols, Coheen Coob and Lambda, and thus find the parameters of system gains. knowing the above, comparison tests were performed between the different methods used and it was obtained that the best method was to derive the signal and apply the smith's method characterization, after finding the dynamics of the process, the different tuning methods were applied, compared and it was obtained that the most efficient method was the tuning of Ziegler Nichols for a PD controller, since the signal stabilizes in less time and does not present almost damping, To validate the tests, comparisons is make it with a theoretical method and with a device that allows modeling a real DC motor.

**Keywords:** Integrating system, Controller, PD Controller, Tuning methods, Characterization methods, Dead time, First order

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Lista de tablas y figuras.....	8
Lista de símbolos .....	10
Introducción.....	11
Planteamiento del problema .....	14
Justificación.....	16
Objetivos .....	17
3.1 Objetivo general .....	17
3.2 Objetivos específicos.....	17
Marco teórico – conceptual .....	18
1.1 Conceptos básicos relacionados a los sistemas. ....	20
Partes del sistema .....	22
Tipos de sistema.....	24
Tipos de sistema según su respuesta. ....	26
2.1.1 Sistema autorregulado.....	26
2.1.2 Sistema integrante.....	27
2.1.3 Sistema inestable .....	28
2.2 Métodos de caracterización.....	29
Método de ziegler-nichols .....	30
Método de Miller .....	31
Método de Smith.....	32
Método de Alfaro .....	33
2.3 Métodos de sintonización .....	33
Métodos de sintonización de lazo abierto.....	35
2.3.1 Sintonización de ziegler-nichols.....	35
2.3.2 Sintonización de Cohen Coob .....	35

2.3.3 Sintonización lambda.....	37
Controladores.....	37
Materiales .....	42
2.4 Software Matlab .....	42
2.5 Software LabVIEW .....	43
2.6 Quanser QNET DC motor board 2.0 for NI ELVIS II/II+ .....	44
3 Metodología.....	46
3.1 Métodos de caracterización para sistemas de integración pura mas (FOPDT)....	46
3.2 Caracterización.....	50
Método de la tangente de Ziegler Nichols.....	50
Método de la tangente de Miller .....	51
Método de Smith.....	52
Método de Alfaro .....	54
Practica con motor DC .....	58
3.3 Caracterización.....	61
Método de la tangente de Ziegler Nichols.....	61
Método de la tangente de Miller .....	62
Método de Smith.....	63
Método de Alfaro .....	65
Métodos de sintonización para sistemas de integración pura mas (FOPDT) .....	68
Métodos de sintonización de lazo abierto.....	70
3.3.1 Sintonización método de Ziegler Nichols .....	70
Conclusiones.....	80
Referencias .....	82

## Lista de tablas y figuras

### Tablas

Tabla 1: Formula de controladores de Ziegler Nichols de lazo abierto.....	35
Tabla 2: Formula de controladores de Coheen Coob de lazo abierto.....	36
Tabla 3: Formula de controladores , Lambda de lazo abierto .....	37
Tabla 4: Tabla comparativa de los parámetros de caracterización .....	56
Tabla 5: Tabla comparativa de los parámetros de caracterización, Motor DC .....	67
Tabla 6: Fórmulas de los métodos de sintonización evaluados en este trabajo .....	72
Tabla 7: Resultado de los métodos de sintonización evaluados. ....	73
Tabla 8: IAE de los diferentes controladores.....	79

### Figuras

Figura 1: Sistema de 1 orden más tiempo muerto.....	21
Figura 2: Diagrama de bloques de un sistema. ....	24
Figura 3: Diagrama de bloques de sistema de lazo abierto.....	25
Figura 4: Diagrama de bloques de sistema de lazo cerrado.....	26
Figura 5: Respuesta autorregulada. ....	27
Figura 6: Respuesta integrante. ....	28
Figura 7: Respuesta inestable.....	29
Figura 8: Método de caracterización de Ziegler Nichols .....	30
Figura 9: Método de caracterización de Miller. ....	31
Figura 10: Método de caracterización de Smith .....	32
Figura 11: Método de caracterización de Alfaro.....	33
Figura 12: Sintonización de lazo abierto. ....	34
Figura 13: Sintonización de lazo cerrado .....	34
Figura 14: Portada del Programa de MATLAB .....	43
Figura 15: Portada del programa LabVIEW. ....	44
Figura 16: Equipo Quanser de Motor DC.....	45
Figura 17: Diagrama de bloques de una señal integrante en simulink. ....	47
Figura 18: Señal de entrada, una suma de escalones.....	47
Figura 19: Respuesta del sistema integrante.....	48
Figura 20: diagrama de bloques, respuesta integrante más el derivador. ....	48
Figura 21: Respuesta. Derivada .....	49
Figura 22: Señal de entrada y su respectiva salida con su línea tangente. ....	50
Figura 23: Señal de entrada y su respectiva salida con su línea recta en 63.2% de la respuesta. ....	51
Figura 24: Señal de entrada y su respectiva salida con los puntos tomados en el 28.3% y 63.2% de la salida. ....	52



Figura 25: Señal de entrada y su respectiva salida con los puntos tomados en el 25% y 75% de la salida. ....	54
Figura 26: Comparación de todos los métodos.....	55
Figura 27: Diagrama de bloques de la Integral del valor absoluto del error. ....	56
Figura 28: Subsistema de la Integral del valor absoluto del error.....	57
Figura 29: Diagrama de bloques para obtener la Integral del valor absoluto del error de las distintas respuestas.....	57
Figura 30: QNET DC Motor Control Trainer.....	58
Figura 31: QNET-DCMCT control de posición. ....	59
Figura 32: Modelamiento Motor DC Matlab.....	59
Figura 33: Señal de posición Derivada.....	60
Figura 34: Método de la tangente de Ziegler Nichol.....	61
Figura 35: Método de la tangente de Miller. ....	62
Figura 36: Método de Smith. ....	63
Figura 37: Método de Alfaro. ....	65
Figura 38: Respuesta de la Comparación de todos los métodos. ....	66
Figura 39: Diagrama de bloques para obtener la Integral del valor absoluto del error: ..	67
Figura 40: Diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado propuesto. ....	68
Figura 41: Respuesta del sistema con el control P Ziegler y Nichols lazo abierto .....	74
Figura 42: Respuesta del sistema con el control PD Ziegler y Nichols lazo abierto .....	74
Figura 43: Respuesta del sistema con el control P Cohen Coob lazo abierto.....	75
Figura 44: Respuesta del sistema con el control PD Cohen Coob lazo abierto .....	75
Figura 45: Respuesta del sistema con el control P sintonización Lambda. ....	76
Figura 46: Respuesta del sistema con el control PD sintonización Lambda. ....	76
Figura 47: Respuesta del sistema con el control P Actual del Motor DC. ....	77
Figura 48: Respuesta del sistema con el control PD Actual del Motor DC. ....	78
Figura 49: Respuesta del sistema con el control PID Actual del Motor DC. ....	78
Figura 50: Respuesta del sistema con el control PD propuesto. ....	79

**Lista de símbolos**

IAE: (Integral absolut error), integral de error absoluto.

IFOPDT: (Integrating First order plus dead time) Integrante de primer orden más tiempo muerto.

$K_p$ : Ganancia proporcional.

$K_i$ : Ganancia integral.

$K_D$ : Ganancia derivativa.

$K_c$ : Ganancia critica para sintonización en lazo cerrado.

$\delta$ : Ganancia del sistema.

$t_0$ : Tiempo muerto.

$\tau$ : Tiempo de estabilización.

$t_1$ : Tiempo cualquiera tomado de la gráfica.

$t_2$ : Tiempo cualquiera tomado de la gráfica diferente de  $t_1$ .

$T_i$ : Tiempo integral.

$T_D$ : Tiempo derivativo.

$T_c$ : Tiempo crítico para sintonización en lazo cerrado.

PI: Algoritmo de control proporcional integral.

PD: Algoritmo de control proporcional derivativo.

STEP: Entrada del sistema tipo escalón.

## Introducción

Shinskey (1996) afirma que los procesos de integración, se encuentran con frecuencia en las industrias, por ejemplo son procesos como el de nivel de llenado de un tanque, los procesos químicos, los reactores y los sistemas de posición de un motor. Dulhoste (2013) y Schermann & García-Gabín, (2006) afirman que el comportamiento dinámico de los procesos típicos de la industria pueden describirse usando modelos simplificados, compuestos por ganancias de procesos, tiempos muertos y tiempos de estabilización. Madady & Reza-Alikhani (2012), Cvejn (2009) y García & Albertos (2008) señalan que estos procesos se pueden modelar mediante una función de transferencia estable de primer orden más tiempo muerto (FOPDT). Kuo (1996) expresa que todos los procesos no se pueden tratar de la misma forma, estos procesos no permiten una sencilla parametrización, debido a que la dinámica del proceso es más compleja, para entender más a fondo esta problemática, Villajulca (2019a) expresa que existen tres grupos de respuestas de los procesos, los cuales son: autoregulatorios, integrativos y los inestables, los procesos autoregulatorios son procesos que cuya salida ante una entrada escalón da un valor estable, esto quiere decir que llega un momento en que la señal se estabiliza y poseen una forma de “S”, de aquí se pueden obtener los parámetros de la respuesta, ya sea en estado estable o transitorio. Pero hay procesos industriales los cuales su salida no es un valor estable sino una pendiente, un buen ejemplo de estos procesos es el control de nivel de líquidos, o llenado de un tanque, en donde uno de los flujos ya sea el flujo de entrada o salida es una variable constante y el otro es una variable controlada, si la válvula de dicho sistema es abierta un porcentaje (%), el nivel de líquido del recipiente crecerá a una tasa proporcional,

con la diferencia de los flujos de entrada y salida del recipiente. Hernández Gaviño (2010) y Villajulca (2019b) afirman que graficando este sistema la gráfica tomara forma de pendiente.

Ruíz, (2002) indica que en los sistemas integrantes no es tan sencillos de aplicar un debido control debido a que no se estabilizan, por ende no funcionaría de igual manera un método de sintonización aplicado a un sistema autorregulado, que a un sistema integrante, por eso primero hay que identificar las características de un proceso para poder hallar los parámetros necesarios y así aplicar su debido control. En este documento propondremos un método para poder identificar las características de los sistemas integrantes, (Samygina, Rassudov, & Balkovoi (2018) y Gutierrez (2018). plantean un método que se basa en ecuaciones, además los métodos que se encuentran en diferentes textos son métodos que se basan en ecuaciones, que se fundamentan en el comportamiento de cada uno de los componentes del sistema, para luego formar una función de transferencia.

El método propuesto para el control de estos sistemas integrantes consta de tomar la señal del proceso integrante y derivarla, conocemos que la derivada y la integral (antiderivada) son operaciones contrarias, por ende al derivar dicha señal se convierte en una señal autorregulada o señal con forma de “S” debido a que la señal de entrada o de excitación es una señal escalón, al obtener esta señal con forma de “S” se pueden identificar de una manera sencilla todos las características del sistema. Se examinan diferentes métodos de caracterización de la señal para poder obtener los parámetros exactos, Kadam & Waghmare (2013) refiere a reemplazar los valores obtenidos en la función de transferencia por ende se realiza de esta manera y se compara con la señal integrante original para comprobar si es óptimo implementar este método, luego de la comparación se

examinan diversos métodos de sintonización y así poder aplicar un control para dichos sistemas.

Por lo general para estos sistemas se proponen controladores netamente proporcional, sin embargo si seguimos con el ejemplo del tanque de llenado, para lograr un mayor flujo, se debe abrir en un porcentaje mayor la válvula hasta alcanzar el flujo deseado, no obstante para este tipo de controladores se presenta un problema en el aumento de oscilaciones debido a que el sistema tiene un comportamiento integrante , donde se propone implementar un controlador PD debido a que su comportamiento es más estable y con el controlador derivativo se corrigen los errores del sobrepico y amortiguamiento. Por ende, no se sugiere un controlador que posea una ganancia integral.

### **Planteamiento del problema**

Los procesos industriales presentan diferentes comportamientos dinámicos, la mayoría de procesos en la industria como por ejemplo, Arántegui (2011) verifica que la velocidad de un motor, presentan un comportamiento autorregulado, que se caracteriza por presentar una respuesta con una forma de “S” esto quiere decir que se estabilizan sin embargo existen procesos que su comportamiento no es autorregulado sino que presentan un comportamiento en forma de rampa o exponencial, a estos procesos son denominados procesos integrantes, algunos de estos procesos son el llenado de un tanque, la posición de un motor, calderas de calentamiento y reactores de tanques de agitación continua, Liu & Gao (2010) y Azamfar, Amiri, & Olilo (2014) afirman que estos procesos presentan un método teórico para la identificación dinámica del proceso, Raza, Pathak, & Anwar (2017), Pandey & Majhi (2017) y Kurniawan, Cahyadi, & Ardiyanto (2019) destacan algunos métodos teóricos de diferentes sistemas, en donde se modelan a través de una serie de ecuaciones que permiten determinar los valores de los parámetros de caracterización.

L. Moreno, Garrido, & Balaguer (2003) afirman que estos procesos pueden ser modelados como procesos de integración puro de primer orden más tiempo muerto (IFOPDT) donde se puede representar mediante un diagrama de bloques como un proceso de ganancia puro más un integrador y a partir de aquí podemos por medio de una serie de ecuaciones sacar los parámetros necesarios modelando el sistema y con ayuda de un software que permite realizar operaciones matemáticas complejas en este orden de ideas se busca obtener un método experimental Alfaro Ruíz (2011) que permita la identificación de los parámetros de caracterización evitando el modelo puramente matemático.

Kaya, (2018) afirma que para estos sistemas se propone un tipo de controlador netamente proporcional debido a las características del sistema posee un integrador implícito en el sistema y al implementar un tipo de controlador que posea una ganancia integral, la respuesta del sistema aumentara el amortiguamiento. Sin embargo, este controlador tiene algunos inconvenientes por oscilaciones donde se busca encontrar un controlador que disminuya estas oscilaciones y que se estabilice en menor tiempo. En este orden de ideas se formula la siguiente pregunta. **¿Qué controlador del tipo PID es adecuado para un sistema integrante sin la necesidad de hallar la dinámica del proceso de manera teórica?**

### **Justificación**

Este método de identificación nace de la necesidad de implementar un diseño de control para sistemas que poseen características integrantes, debido a que normalmente los métodos de identificación de estos sistemas, Hambali, Janin, Samsudin, & Ishak, (2013) verifican que para estos sistemas se implementan métodos teóricos que implican la deducción de modelos matemáticos de acuerdo con los principios o leyes que los influyen, como la conversión por formula, el trazado, la búsqueda de ecuaciones que obedecen a leyes específicas, Wang & Cai, (2002) destaca que los principales métodos de caracterización de estos sistemas se basan en métodos en el dominio de la frecuencia. Se propone implementar un método experimental, este consta de la adquisición, la interpretación y el procesamiento de datos, para luego obtener la función de transferencia del proceso.

Sin embargo esto solo se puede realizar modificando la señal integrante, aplicando conceptos matemáticos, y comprendiendo que integral y derivada son operaciones opuestas, se busca tomar la señal integrante y derivarla, al realizar esta operación se obtiene una señal respuesta autorregulada, la cual ya permite obtener los parámetros necesarios de caracterización de la señal, y luego de obtener dichos parámetros se reemplazan en la función de transferencia y se logra observar que la señal obtenida es muy similar a la señal original sin derivar, luego de obtener estos valores se procede a implementar métodos de sintonización para poder implementar un diseño de control en el sistema.



## **Objetivos**

### **3.1 Objetivo general**

- Desarrollar un método de sintonía de controladores PID para sistemas Integrantes.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Analizar y documentar los diferentes métodos de caracterización y de sintonización para aplicar las diferentes configuraciones de control.
- Proponer un método de sintonización basado en un análisis experimental de un sistema integrante.
- Evaluar el desempeño del método de sintonización para aplicar un debido control PID al sistema.

### **Marco teórico – conceptual**

El presente proyecto está orientado para ser desarrollado en un escenario industrial de procesos continuos, posee como ejes temáticos las respuestas de los tipos de sistemas, los métodos de caracterización y los métodos de sintonización y control, se enfoca en desarrollar un método que permita la caracterización de sistemas integrantes. A continuación, se definirán y se describirán las implicaciones teóricas en las cuales se soporta la presente investigación. M. A. Moreno, (2001) destacan que la sintonía de los controladores PID (Proporcional-integral-derivativo) es una tarea primordial desde este ámbito de investigación, sin embargo no es tan sencillo para sistemas que no poseen un comportamiento estable o autorregulado, los cuales ya poseen un conjunto de métodos que permiten la caracterización y sintonización para las diferentes configuraciones de controladores, sin embargo para sistemas que no son autorregulados en este caso en específico los sistemas integrantes estos métodos son más complicados, debido a que conlleva una serie de ecuaciones diferenciales, que hacen complicada hallar la dinámica del proceso para implementar métodos que permitan una correcta sintonización de los controladores. Alfaro, (2017) Afirman que existen tres tipos de respuestas principalmente, las cuales son las respuestas autorreguladas los cuales ante cambio de estímulo su respuesta se estabiliza en un punto y presentar un retardo haciendo que estos posean forma de “S”, los sistemas integrantes los cuales presentan ante un cambio de estímulo, un crecimiento o decrecimiento en forma constante, donde la variable de salida tiende a infinito por ende no poseen una ganancia estacionaria, los sistemas inestables los cuales presentan un

crecimiento o decrecimiento exponencial sin cota, y ante una razón de cambio este crecerá en el tiempo exponencialmente hasta un límite físico que puede ser catastrófico.

Complementariamente se documentaron los métodos de caracterización que son necesarios para hallar los parámetros que permiten simular la dinámica de los procesos, para identificar un sistema existen diversos métodos sin embargo estos se dividen en dos tipos, métodos de lazo abierto y métodos de lazo cerrado, donde los métodos de lazo abierto se dividen en tres tipos los cuales son, métodos de la tangente, en los cuales podemos encontrar el método de Ziegler Nichols y el método de Müller, los métodos de dos puntos dentro los cuales podemos encontrar los métodos de Smith y Alfaro y por último los métodos de tres puntos realizando comparaciones entre los métodos escogidos y comparados para seleccionar cual es el que presente menor índice de error, luego se documentaron los métodos de sintonización, Alberino, Folino, Verrastro, & Gomez, (2011) implementaron una comparación con el fin de establecer los valores que deben tener los parámetros de los valores de ganancia del sistema para que este responda de forma adecuada, y se busca obtener la información dinámica y estática del proceso. Existen diversos métodos para ajustar los valores de ganancia de los controladores PID. No obstante estos se clasifican en dos tipos, de lazo abierto y de lazo cerrado, Polo & Hernández (2018) menciona la aplicación de los métodos de lazo cerrado, que se basan a partir de un test en lazo cerrado con un controlador puramente proporcional haciendo que la respuesta del sistema tenga oscilaciones sostenidas. Maldonado (2017) menciona la aplicación de los métodos de lazo abierto, que se obtienen mediante una respuesta a un escalón y se obtienen los parámetros a partir de la curva de respuesta. Santos (2018) analiza el método de Ziegler Nichols el cual se implementó en este documento y se basa en la

respuesta a un escalón y a su vez en obtener dos parámetros  $\tau$  y  $T$  para ser reemplazados en ecuaciones sencillas y que van ligados a los parámetros de ganancias de los controladores.

Ramos (2018) analizó el Método de Cohehen Coob el cual se basa en obtener dos parámetros  $\tau$  y  $T$  las cuales son determinadas a partir de la respuesta al escalón y por medio del trazado de una línea tangente. Con estos métodos se realizaron comparaciones a partir de los diferentes controladores PID, dentro de estos controladores encontramos los controladores proporcionales este controlador permite que la respuesta se acerque al valor establecido sin embargo, este acercamiento implica la aparición de un estado transitorio u oscilaciones, controlador integral, su función es hacer nulo el error en estado estable sin embargo este controlador presenta muchas oscilaciones, controlador derivativo, su función es reducir las oscilaciones en la respuesta del sistema, para así tomar el método que presente el menor índice de error IAE.

### 1.1 Conceptos básicos relacionados a los sistemas.

**Planta:** Perez M, Pérez A, & Pérez E (2008) expresa que una planta es un objeto físico o parte de un equipo, que puede ser controlado, y que está destinado a realizar un proceso. Algunos ejemplos de plantas son: horno de calentamiento, reactor químico, motor, llenado de tanque, etc.

**Proceso:** Paz, (2011) expreso que proceso es una operación o conjunto de operaciones o pasos, con una secuencia determinada, que conllevan unos cambios con el fin de conseguir un resultado final, en otras palabras es una operación que se va a controlar, algunos ejemplos de procesos son: químicos, económicos, biológicos, físicos, etc.

**Control retroalimentado:** Kuo (1996) expreso el control retroalimentado como una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continua haciendo con base en esta diferencia.

**Primer orden con retardo:** Bueno (2011) expreso un proceso de primer orden con retardo como una respuesta sin oscilaciones, esto quiere decir que son relativamente lentos y no llegan al valor exacto de la consigna y presenta un desfase o retardo respecto a la señal de entrada.

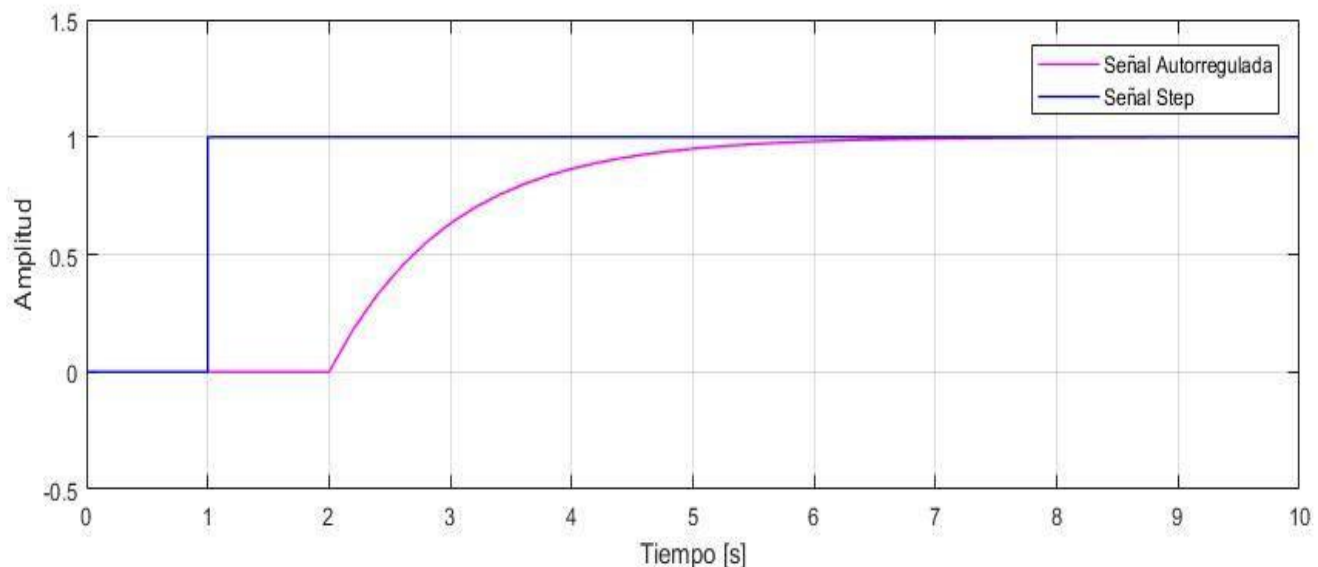


Figura 1. Sistema de 1 orden más tiempo muerto. Fuente: Propia.

Donde la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-t_0 s}}{Ts + 1}$$

**Función de transferencia:** Se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (la respuesta del sistema) y la transformada de Laplace de la entrada, bajo la

suposición de que todas las condiciones iniciales son cero, esto quiere decir que se asume un sistema que se encuentra en reposo.

**Estabilidad del sistema:** Atıç & Kaya (2017) expresan que un sistema es estable si al ser sometido a una perturbación la salida de este alcanza eventualmente un estado de equilibrio, esto quiere decir que la salida se mantiene en un valor constante o presenta oscilaciones entre un rango considerable, si el sistema oscila fuera de dicho rango o cota quiere decir que el sistema es inestable.

La estabilidad depende del sistema propio y no de la señal de entrada o función excitadora.

**Motor DC:** Gutierrez (2018) expresa que un motor es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica, provocando un movimiento rotatorio, debido a la acción de su campo magnético.

## Partes del sistema

**Variable controlada y manipulada:** La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla, y la variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica con el fin de influir en la variable controlada para variar la salida del sistema.

**Controlador:** Peñaranda, Silva, & Gómez (2014) expresa como controlador a un elemento o equipo cuya función es comparar la señal censada con el valor deseado o set point y proporcionar al actuador una señal de corriente esto quiere decir que para una entrada determinada brinda una salida determinada.

Estos equipos poseen muchas funciones como, por ejemplo, realizar el control, indicar y limitar variables, etc.

**Set point:** o también conocido como consigna, es el valor deseado de la variable del proceso o variable controlada

**Error:** es la diferencia entre la variable del proceso y el set point o valor deseado,

**Perturbaciones:** Es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de salida de un sistema, si la perturbación ocurre dentro del sistema es interno, y es externa si es fuera del sistema.

**Realimentación:** Es una propiedad de los sistemas que permiten que la salida del sistema sea comparada con la entrada del sistema, de tal manera que se pueda aplicar una acción de control.

**Sistema:** Es una combinación de componentes capaz de administrar, ordenar, dirigir y regular el comportamiento un proceso y actúan juntos con el fin de realizar un objetivo determinado

Hernández Gaviño (2010) manifiesta que un sistema puede ser representador por medio de bloques, y estos están conformados de la siguiente manera: una entrada, el comportamiento del sistema, y una salida. Además, pueden ser modelados por un conjunto de ecuaciones que ayudan a representar la dinámica del proceso.

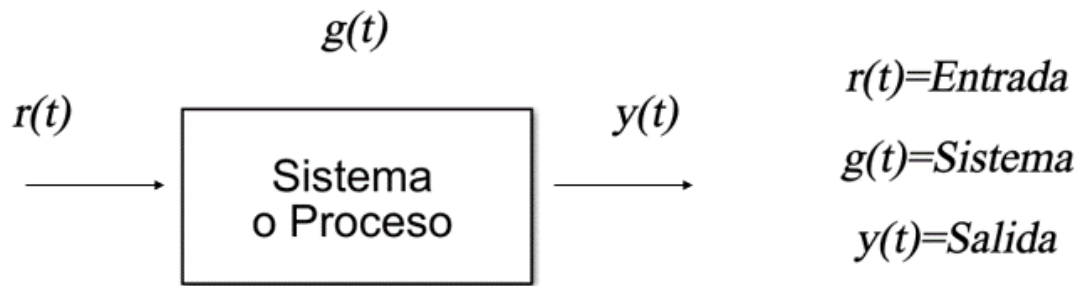


Figura 2. Diagrama de bloques de un sistema. Fuente: propia

La asociación entrada-salida es una relación de origen y resultado con el sistema, por lo que el proceso a controlar (también llamado planta) relaciona la salida con la entrada. Las entradas más comunes aplicadas a los sistemas de control son: impulso, rampa y escalón

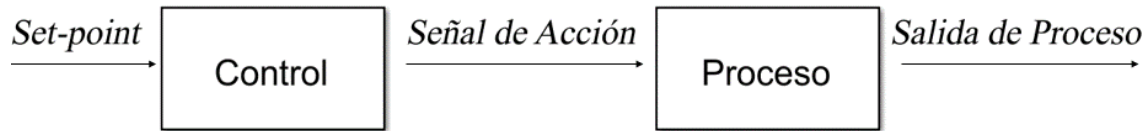
### Tipos de sistema

Los sistemas se dividen en dos tipos los cuales son los sistemas de lazo abierto y los sistemas de lazo cerrado.

**Sistema de lazo abierto:** Gaviño (2010) expresan que un sistema de lazo abierto es aquel que cuya acción de control es independiente de la salida, esto quiere decir que tienen un regulador o actuador cuya función es obtener la respuesta deseada, luego que el sistema llega a esta respuesta, ya es independiente. Esto quiere decir que no se hacen correcciones en el proceso debido a que no hay una retroalimentación.

En este sistema la salida es dependiente de la entrada. Un ejemplo de estos sistemas son: Los semáforos, los microondas, las lavadoras.





*Figura 3. Diagrama de bloques de sistema de lazo abierto. Fuente: propia.*

Los elementos de este sistema se dividen en dos partes, el controlador y los procesos a controlar. En donde se aplica una señal de entrada al controlador cuya salida actúa como una señal que modifica o regula el proceso, de tal forma que la señal de salida se modifique de acuerdo a ciertas especificaciones.

**Sistema de lazo cerrado (retroalimentado):** Dulhoste (2013) expresan que la acción de control es dependiente de la salida, estos sistemas poseen un sensor y una retroalimentación, este sensor detecta la respuesta real para así realizar una comparación, con esta referencia a manera de entrada. Torres Capuz, Martinez, & Ximena (2015) verifica esta relación y nos permite realizar una comparación entre la salida real y el comportamiento deseado, para poder una acción correctora sobre el proceso. Un ejemplo de estos sistemas son: Los termostatos del aire acondicionado, y sistemas de iluminación de un invernadero. Se caracteriza porque tiene una retroalimentación a través de los sensores desde el proceso hasta el sistema de control que permite conocer si las acciones ordenadas a los actuadores se han realizado correctamente.

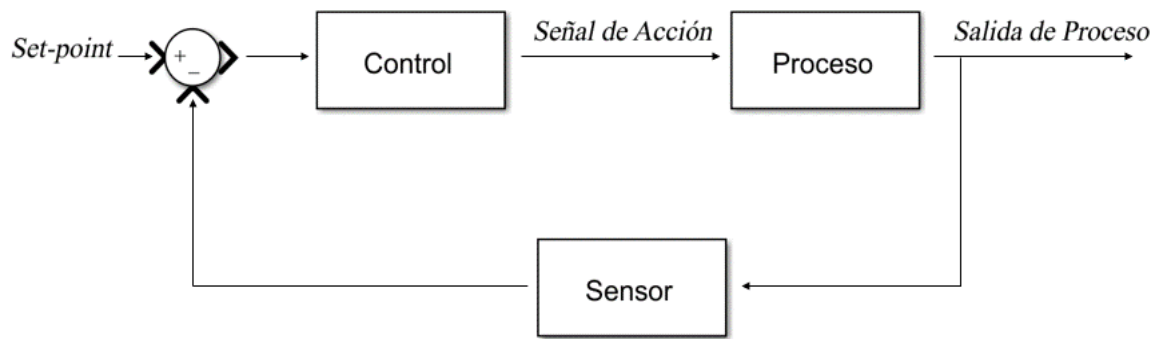


Figura 4. Diagrama de bloques de sistema de lazo cerrado. Fuente: propia.

### **Tipos de sistema según su respuesta.**

Los sistemas se clasifican según su respuesta, sistemas autorregulados, sistemas integrantes y sistemas inestables. Se establecen los procedimientos para el ajuste de los parámetros de las respectivas respuestas autorreguladas o estables, integrantes e inestables. Estos tienen como base la información de la curva de reacción del proceso.

#### **2.1.1 Sistema autorregulado**

Procesos self-regulation o autoregulatorios son caracterizados por su habilidad de estabilizarse a un valor nuevo de la variable del proceso, cuando se presenta un cambio de set point o perturbación, estos procesos requieren una acción integral en el controlador para así poder eliminar el offset, un aumento en la ganancia proporcional o integral en estos sistemas provocan oscilaciones y su comportamiento tiene una forma de “S”.

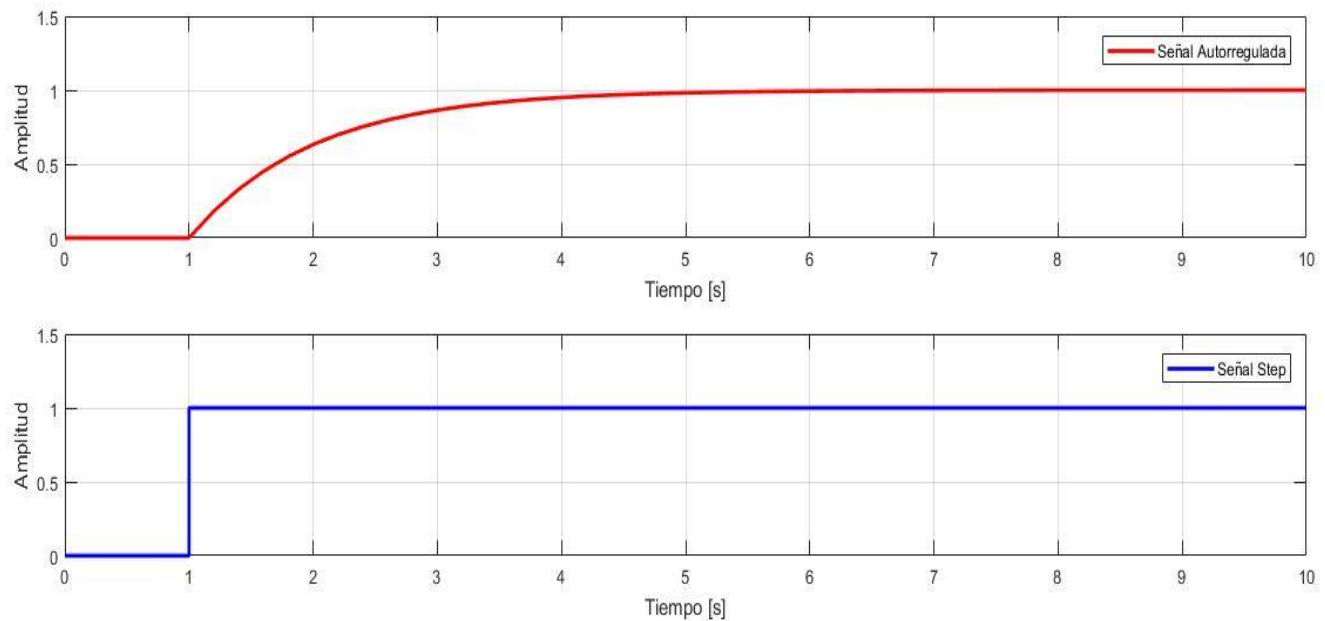


Figura 5. Respuesta autorregulada. Fuente: propia

### 2.1.2 Sistema integrante

Camacho, Rojas, Garcia, & Alvarez (1998) y Majhi & Atherton (2015) describen a los procesos integrativos como sistemas que están caracterizados por un crecimiento sostenido de la variable de proceso, esto quiere decir que su salida tiene forma de rampa, y esto ocurre cuando se presenta un desbalance de la energía de flujo de entrada y salida del proceso, estos procesos son idealmente controlados por una acción netamente proporcional, la cantidad de acción proporcional dependen del tiempo de retardo del sistema y el ruido del sistema.

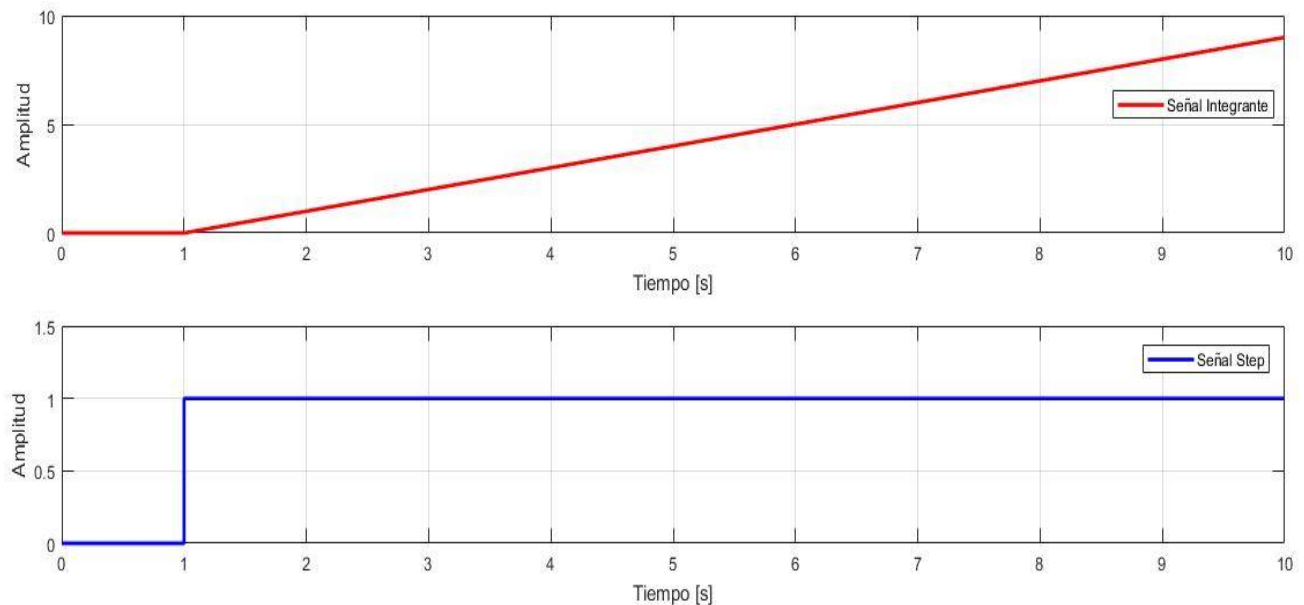


Figura 6. Respuesta integrante. Fuente: propia.

### 2.1.3 Sistema inestable

Chidambaram & Saxena (2018) describe a los sistemas runaway o inestables como sistemas que están caracterizados por su respuesta exponencial de la variable de proceso, esta inestabilidad ocurre de alguna forma de retroalimentación positiva, algunos ejemplos de este tipo de sistemas son (reactores agitados exotérmicos con mezcla inversa, reactores discontinuos, bomba con tanque de almacenamiento de líquido, intercambiador de calor combinado de alimentación efluente con reactor exotérmico adiabático, etc.)

Panda (2009) sugiere que estos sistemas no se pueden controlar solamente con una acción derivativa o una acción proporcionales e integrales, sino que se debe aplicar una acción derivativa para estabilizarlo, una forma de estabilizar estos procesos es introduciendo en el sistema una retroalimentación negativa.

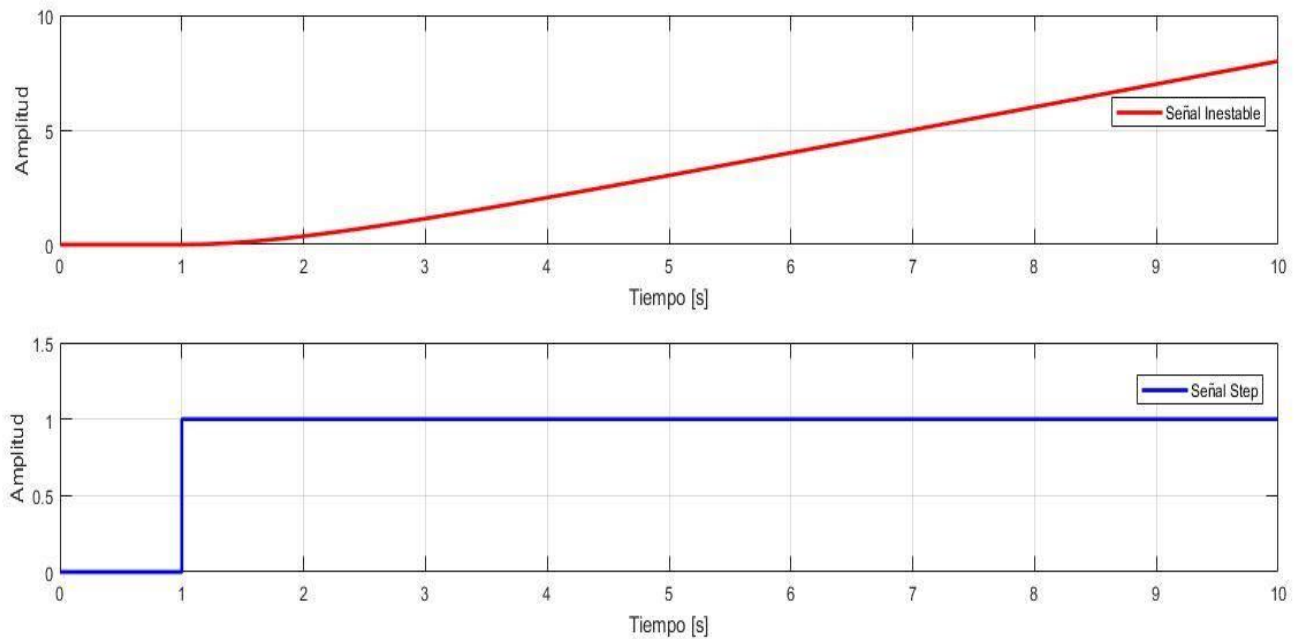


Figura 7. Respuesta inestable. Fuente: propia.

## 2.2 Métodos de caracterización

El concepto de optimización de los sistemas de control abarca dos etapas las cuales son:

Tacconi, Mantz, Solsona, & Puleston (2005) mencionan que se debe realizar una selección de índices de performance o caracterización y el diseño en base a la minimización o maximización de dichos índices o sintonización. Estos índices es un valor que indica hasta qué punto el funcionamiento efectivo del sistema se acerca al funcionamiento deseado, el índice de performance determina en si la configuración del sistema. Debe comprenderse que un sistema de control óptimo obtenido matemáticamente, en la mayor parte de los casos prácticos por lo general no es un objetivo alcanzable.

### Método de ziegler-nichols

Mok, Kim, Park, & Rhew (1988) se refiere a este método como el primer método de identificación propuesto.

Este método consiste en trazar una línea tangente a la respuesta del sistema o curva de reacción en el punto de inflexión o punto de máxima pendiente. Para obtener el modelo, se debe identificar la ganancia del sistema, el tiempo de estabilización y el tiempo muerto.

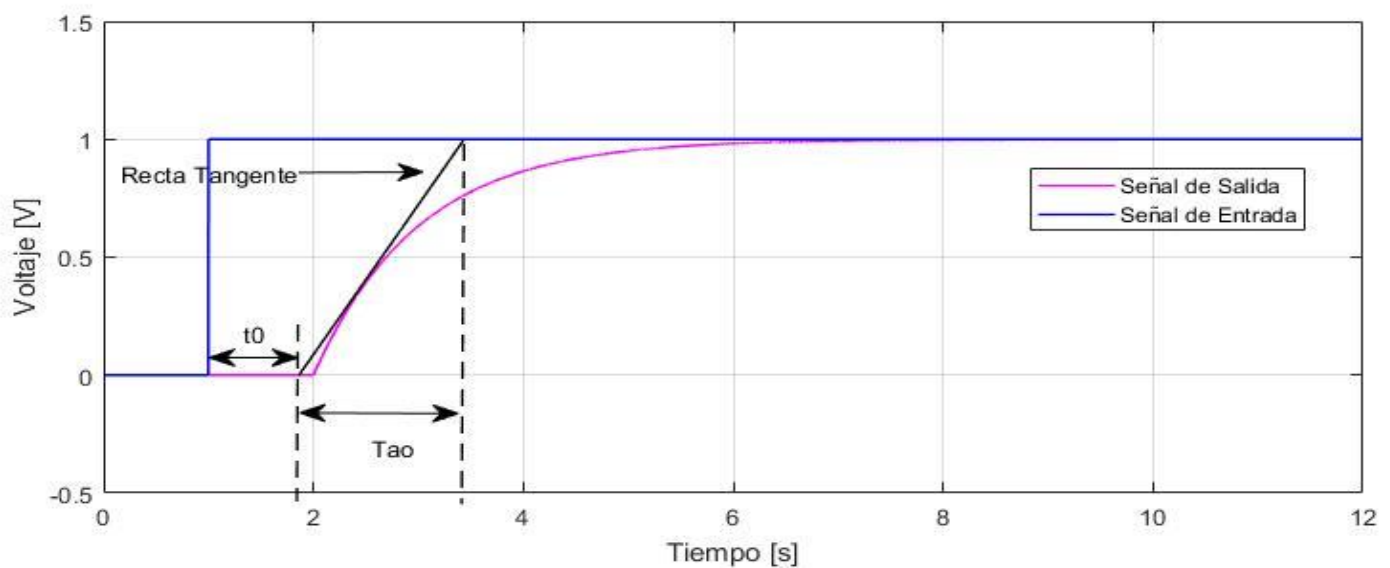


Figura 8: Método de caracterización de Ziegler Nichols. Fuente: propia.

### Método de Miller

Martínez (2011) describen este método como una variación del método de Ziegler-Nichols, en donde también se debe trazar una línea tangente en el punto de inflexión y el tiempo muerto también se calcula desde el inicio del sistema hasta donde inicia la recta tangente, el cambio se presenta en el tiempo de estabilización, ya que este sería desde donde inicia la recta tangente hasta cuando se llega al 63.2% de la respuesta del sistema.

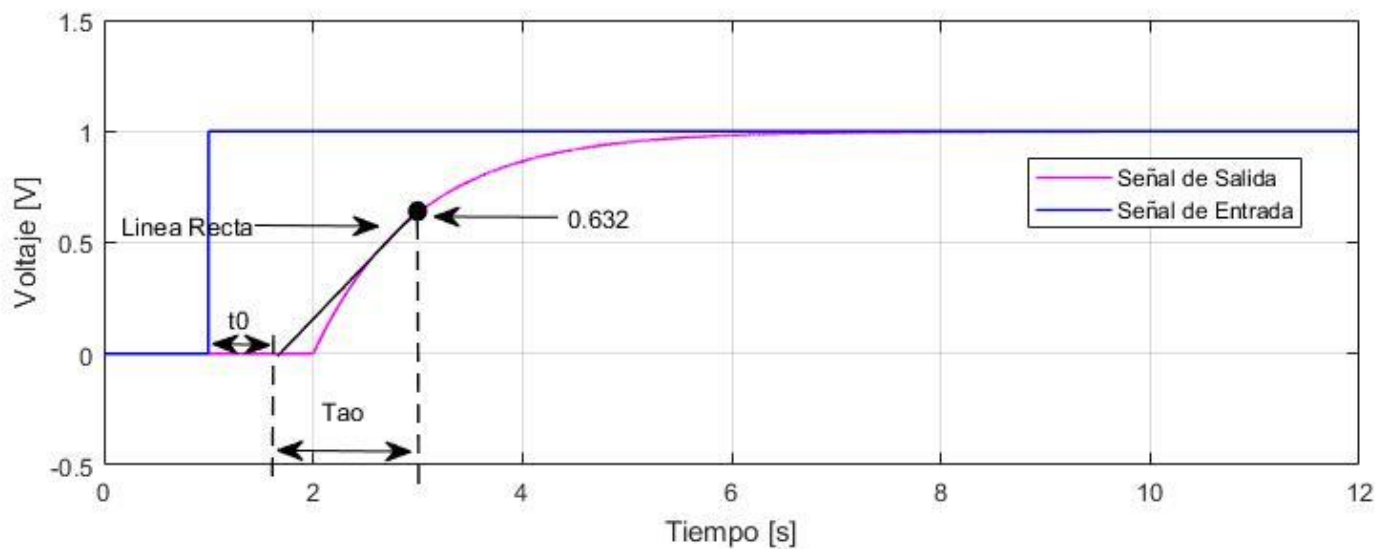


Figura 9. Método de caracterización de Miller. Fuente: propia.

### Método de Smith

Smith, Corripio, & Basurto (1991) y Araújo, Jeronymo, Coelho, & Gomes (2015) mencionan que esta técnica no requiere que se trace la recta tangente en el punto de inflexión; el autor propone la selección de dos puntos en la curva de reacción del proceso para hallar  $\tau$  y  $t_0$ , para esto se construye dos ecuaciones con dos incógnitas seleccionando dos puntos en la curva de reacción. Smith propuso que estos puntos fueran el 28.3% y 63.2% del valor final del proceso.

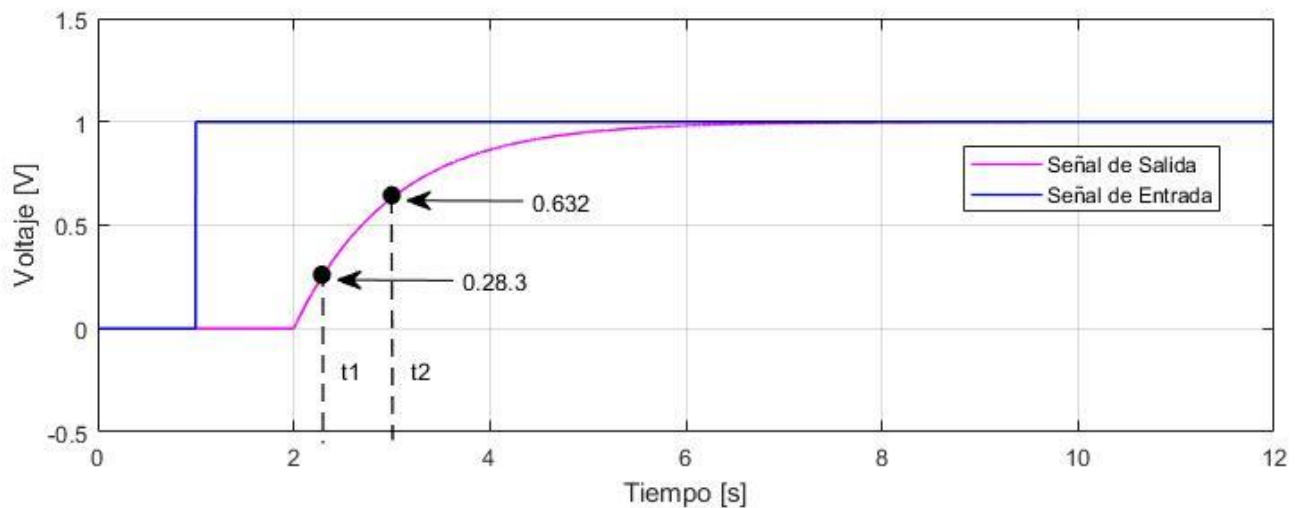


Figura 10. Método de caracterización de Smith. Fuente: propia.



### Método de Alfaro

El autor propone a diferencia de Smith escoger como puntos en la curva de reacción cuando se alcance el 25% y el 75% del valor final del proceso, para hallar  $\tau$  y  $t_0$

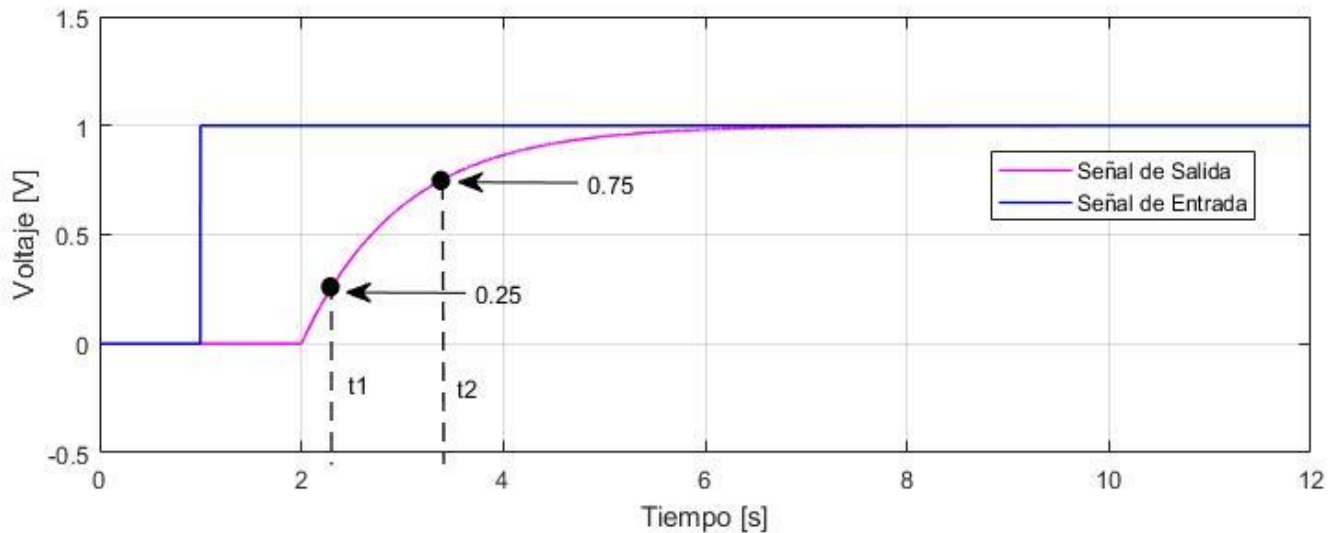


Figura 11. Método de caracterización de Alfaro. Fuente: propia.

### 2.3 Métodos de sintonización

**Sintonía:** Atıç & Kaya (2017) describe la sintonía como una manera para determinar los parámetros de control de acuerdo con un conjunto de especificaciones para el sistema.

#### Estimación en lazo abierto

La mayoría de procesos ante una entrada escalón presentan una salida creciente y estable y a partir de dicha respuesta se busca estimar los parámetros ( $\delta, \tau, t_0$ ) que mejor aproxime las características del sistema

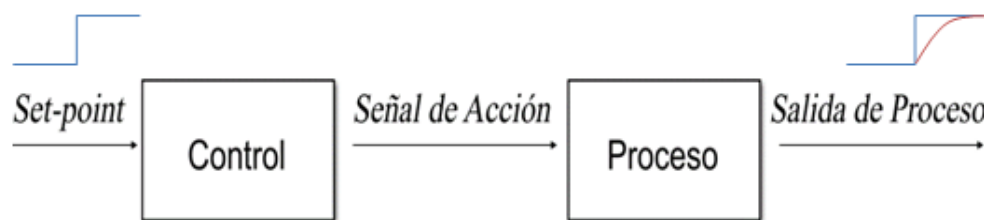


Figura 12. Sintonización de lazo abierto. Fuente: propia.

### Estimación en lazo cerrado

La mayoría de procesos al aplicarle una ganancia proporcional su salida puede ser una oscilación mantenida, donde se hallan los parámetros  $(\delta_c, t_c)$

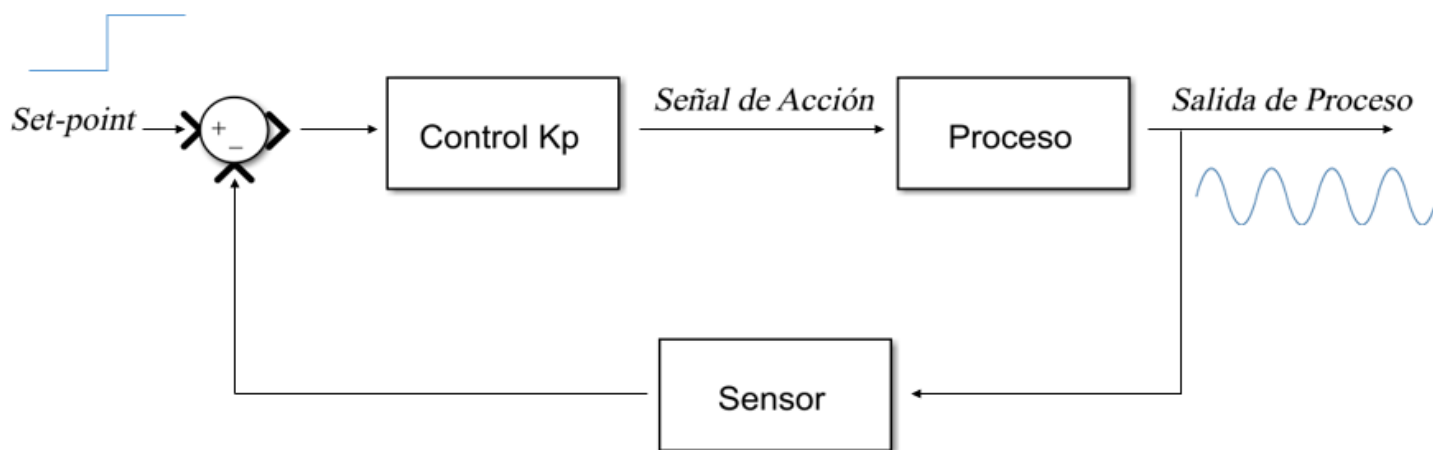


Figura 13. Sintonización de lazo cerrado. Fuente: propia.

## Métodos de sintonización de lazo abierto

### 2.3.1 Sintonización de ziegler-nichols

Akshay & Subbulekshmi (2017) menciona que este método utiliza la respuesta temporal del sistema la cual tiene forma de “S”, se procede a trazar la pendiente en el punto de inflexión y hallar Las constantes  $t$  y  $t_0$  donde pueden definirse como tiempo de estabilización y tiempo muerto respectivamente.

Sarić, Čustović, Jokić, & Jurić (2019) verifica que se puedan implementar estas ecuaciones con los parámetros anteriormente encontrados.

Tabla 1

*Formula de controladores de Ziegler Nichols de lazo abierto.*

	Control	$K_P$	$t_I$	$t_D$
<b>Ziegler Nichols (Lazo abierto)</b>	<b>P</b>	$\frac{t}{\delta t_0}$		
	<b>PI</b>	$\frac{0.9t}{\delta t_0}$	$3t_0$	
	<b>PID</b>	$\frac{1.2t}{\delta t_0}$	$2t_0$	$0.5t_0$

*Fuente: propia*

### 2.3.2 Sintonización de Cohen Coob

Torres Capuz et al. (2015) menciona que este criterio consiste en aplicar una entrada escalón directamente al sistema sin controladores, y se hallan los parámetros a partir de la

curva de reacción del proceso, una característica de la curva de reacción es que esta tiene forma de “S”.

A partir de la curva de reacción del proceso se traza una línea tangente en el punto de inflexión, de tal manera que la línea tangente y el eje x o eje de tiempo represente el atraso de tiempo o  $t_0$  y la conociendo la ganancia, estos parametros se reemplazan en los diversos controladores.

Tabla 2

*Formula de controladores de Coheen Coob de lazo abierto*

	Control	$K_P$	$t_I$	$t_D$
	<b>P</b>	$\frac{\tau}{\delta t_0} \left[ 1 + \frac{t_0}{3\tau} \right]$		
<b>Cohen Coob</b> <b>(Lazo abierto)</b>	<b>PI</b>	$\frac{\tau}{\delta t_0} \left[ 0,9 + \frac{t_0}{12\tau} \right]$	$\frac{t_0(30t + 3t_0)}{9t + 20t_0}$	
	<b>PDI</b>	$\frac{\tau}{\delta t_0} \left[ \frac{4}{3} + \frac{t_0}{4\tau} \right]$	$\frac{t_0(32t + 6t_0)}{13t + 8t_0}$	$\frac{4t_0t}{11t + 2t_0}$

*Fuente: propia.*

### 2.3.3 Sintonización lambda

Tabla 3

*Formula de controladores ,Lambda de lazo abierto.*

	Control	$\lambda$	$\lambda'$
<b>Lambda</b>	<b>P</b>	<b>0</b>	$t_0$
$K_c = \frac{t}{\delta(\lambda + t_0)}$	<b>PI</b>	$t_0$	$2t_0$
$t_I = t$	<b>PID</b>	$0.2t_0$	$1.2t_0$
$t_D = \frac{t_0}{2}$			

*Fuente: propia.*

### Controladores

La familia de los controladores PID se encontrarán 3 diferentes acciones, las cuales son:

Proporcional (P), integral (I), y derivativo (D), y los controladores se basan en estos o

unas configuraciones de estos y podemos encontrar:

- Control proporcional
- Control integral
- Control proporcional - integral
- Control proporcional - derivativo
- Control proporcional – integral – derivativo

La implementación de estos controladores se basa en las necesidades o condiciones de operación y naturaleza del sistema, esto incluyen consideraciones como costos, disponibilidad, precisión, seguridad, fiabilidad, etc.

Estos controles ofrecen al usuario la capacidad de programar una determinada operación de modo que se realice de forma regular, un sistema que haya sido correctamente preparado hará que el sistema sea independiente de las perturbaciones externas.

**Control proporcional:** Distefano, Stubberud, & Williams (1995) afirman que este tipo de control tiene una salida  $A_{out}$  proporcional a su entrada  $E$  esto es  $A_{out}=kpE$ , en donde  $kp$  es la constante de proporcionalidad. El sistema responde de manera proporcional a la señal de error, el error en estado estacionario se reduce si se incrementa el valor de la ganancia sin embargo esto causaría que la respuesta fuese más oscilatoria.

Esta ganancia se define matemáticamente como:

$$A_{out} = K_p \epsilon$$

**Dónde:**

$A_{out}$ : salida de control.

$K_p$ : Ganancia proporcional.

$\epsilon$ : Error.

Esto quiere decir que la amplitud de la salida de la etapa de control es igual al error del proceso multiplicado por la ganancia proporcional. Para describir las características del controlador proporcional se debe dar los límites  $u_{max}$  y  $u_{min}$  de la variable de control. El rango lineal puede ser especificado, ya sea por la pendiente dada en la curva característica (ganancia  $k$  del controlador) o bien por el rango donde la curva característica es lineal (conocida como banda proporcional  $P_b$ )

Paz (2011) y Torres Capuz et al. (2015) verifican que este controlador funciona como un controlador on-off cuando los errores son muy grandes

**Características**

- El tiempo de elevación experimenta una pequeña reducción.
- El máximo pico de sobreimpulsó se incrementa.
- El amortiguamiento se reduce.
- El tiempo de asentamiento cambia en pequeña proporción.
- El error de estado estable disminuye con incrementos de ganancia.
- El tipo de sistema permanece igual.

**Controlador integral:** Ribić & Mataušek (2012) menciona que la ganancia integral es una amplificación de la señal de error del proceso, sin embargo, esta depende del tiempo. Este controlador elimina el error en estado estacionario en respuesta al escalón unitario. Esta es una mejora importante al controlador proporcional que produce un offset (error de estado estacionario)

Esta ganancia se define matemáticamente como:

$$A_{out} = K_i \int \epsilon \Delta t$$

**Dónde:**

$A_{out}$ : Salida de control

$K_i$ : Ganancia integral

$\int$  : Control de proceso

$\epsilon$ : Error

$\Delta t$ : Cambio en el tiempo

La función principal de este controlador es asegurar que la salida del proceso concuerde con la referencia en estado estacionario, con este control un error positivo siempre producirá un incremento en la señal de control y un error negativo siempre dará una señal

decreciente sin importar cuan pequeño será el error. Gaviño, (2010) señala que el error en estado estacionario siempre será cero con la acción integral

**Control derivativo:** (Torres Capuz et al., 2015). La ganancia diferencial es proporcional a la tasa de cambio de error y realiza una corrección del error antes que esta magnitud sea demasiado grande con el fin de disminuir la sobremodulación del control ante perturbaciones. Este elemento responde únicamente durante la respuesta transitoria y esta no responde a los errores en estado estacionario debido a que la tasa de cambio es cero.

Esta ganancia se define matemáticamente como:

$$A_{out} = K_d \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$$

**Dónde:**

$A_{out}$ : Salida de control.

$K_d$ : Ganancia diferencial.

$\frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$ : Cambio de error dividido entre cambio de tiempo del proceso.

(Smith et al., 1991).

## **Control PI**

Control proporcional-integral este tipo de controlador es la suma de los controladores proporcional e integral y mezclan sus capacidades para sacar lo mejor de cada una haciendo que los sistemas varíen en estas características.

- El amortiguamiento se reduce.
- El máximo pico de sobreimpulsó se incrementa.
- Decrece el tiempo de elevación.



- Se mejoran los márgenes de ganancia y fase.
- El tipo de sistema se incrementa en una unidad.
- El error de estado estable mejora por el incremento del tipo de sistema.

### **Control PD**

Control proporcional y derivativo, este tipo de controlador es la suma de los controladores proporcional y derivativo donde cada uno brinda las mejores características de cada uno haciendo que las características del sistema se varíen de la siguiente manera.

- El amortiguamiento se incrementa.
- El máximo pico de sobreimpulsó se reduce.
- El tiempo de elevación experimenta pequeños cambios.
- Se mejoran el margen de ganancia y el margen de fase.
- El error de estado estable presenta pequeños cambios.
- El tipo de sistema permanece igual.

**Control PID:** Este controlador es la suma de los 3 controladores principales (proporcional-integral-derivativo)

Esta ganancia se define matemáticamente como:

$$A_{out} = K_p \epsilon + K_i \int \epsilon \Delta t + K_d \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$$

## **Materiales**

### **2.4 Software Matlab**

The MathWorks (2019) define Matlab cuya abreviatura es (MATrix LABoratory o Laboratorio de matrices), como un sistema de cómputo numérico, que maneja un lenguaje propio y de alto nivel (lenguaje M) para cálculos científicos y de ingeniería, sirve para analizar y diseñar sistemas y productos, y está presente en sistemas de seguridad, naves espaciales, dispositivos de monitorización de salud, también se utiliza para el procesamiento de señales, imágenes, comunicaciones, robótica, entre otros campos.

Está disponible para plataformas como Unix, Windows, Mac, Linux.

#### **Requisitos del sistema:**

- Windows 7 en adelante.
- Procesador Intel o AMD X86-64
- Disco duro de 2GB para el programa y 6GB mínimo para instalación típica.
- RAM 1GB mínimo, 4GB recomendado.
- Tarjeta gráfica, soporte para OpenGL 3.3 recomendado con 1GB en GPU.



*Figura 14. Portada del Programa de MATLAB. Fuente: Mathworks.*

## **2.5 Software LabVIEW**

Corporation, (2019a) define a LabVIEW como un software de ingeniería de sistemas que requiere de pruebas, medidas y control en donde se conecta a un hardware e información de datos, este software ofrece un enfoque de programación grafica que le permite al usuario visualizar cada aspecto de su aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medida y depuración, esta visualización permite una fácil integración de hardware de cualquier proveedor, representar una lógica compleja en forma de diagrama, desarrollar algoritmos de análisis de datos y diseñar una interfaz de usuario personalizada



Figura 15. Portada del programa LabVIEW. Fuente: National Instruments

## 2.6 Quanser QNET DC motor board 2.0 for NI ELVIS II/II+

**Dispositivo de Control de Motor DC NI ELVIS**—La Tarjeta de Motor DC Quanser QNET 2.0 para NI ELVIS II/II+ es una tarjeta de aplicación complementaria para NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II (NI ELVIS II) o NI ELVIS II+. Este dispositivo ha sido desarrollado para la educación para facilitar el aprendizaje activo y práctico de los fundamentos de los controladores PI, PD y PID mediante el modelado de sistemas, la velocidad del motor y el servocontrol. Al usar la Tarjeta de Motor DC Quanser QNET 2.0 para NI ELVIS II/II+, puede ofrecer aprendizaje basado en la experiencia para comprender aplicaciones como la robótica y el transporte.

Corporation (2019b) y (Quanser Innovate Educate, 2009a) definen este dispositivo como un entrenador de motor que se adapta al modelado físico, debido a que el comportamiento del sistema puede ser determinado a partir de este, como por ejemplo el momento de inercia de la rueda puede ser determinado mediante la medición de las dimensiones y la

ponderación de la rueda, las ecuaciones de movimiento del motor se determinarían por la parte mecánica y electromagnética de este. Los parámetros claves de este sistema son la constante del motor y la resistencia eléctrica de la armadura.



*Figura 16. Equipo Quanser de Motor DC. fuente: propia.*

### **Requisitos para usar Quanser**

#### **PC equipado con:**

- NI-ELVIS I y un NI serie E o la tarjeta de la Serie M DAQ.
- NI ELVIS II
- Quanser Ingeniería Trainer (IQNET) módulo.
- LabVIEW 8.6.1 con los siguientes complementos:
- DAQmx
- Diseño de control y módulo de simulación
- Al utilizar ELVIS II: ELVISmx instalado para los conductores requeridos.
- Al utilizar ELVIS I: CD ELVIS 3.0.1 o posterior.

### 3 Metodología

#### 3.1 Métodos de caracterización para sistemas de integración pura mas (FOPDT)

En el siguiente trabajo se pondrá a prueba diferentes métodos de caracterización para observar cuál de estos es más eficiente al momento de encontrar las variables  $\delta$ ,  $\tau$ ,  $t_0$  para realizar un arreglo de control.

Para realizar las pruebas con los diferentes métodos de caracterización se utilizó la siguiente función de transferencia.

**Función de transferencia:**

$$G(s) = \frac{\delta e^{t_0 s}}{(ts+1)s} \quad (1)$$

Se utilizará la anterior función de transferencia debido a que es una función de un sistema integrante de primer orden más tiempo muerto.

Para trabajar con esta función de transferencia que no posee un protocolo de identificación se utilizara una técnica la cual consiste en tomar la señal integrante resultante y derivarla, para así obtener una señal de salida en forma de “s” la cual, si podemos aplicar los métodos de caracterización correspondientes para analizar. Luego de haber caracterizado la señal la volvemos a su estado natural con las respectivas constantes encontradas.

**A continuación**, hallaremos las respectivas contantes de una señal integrante.

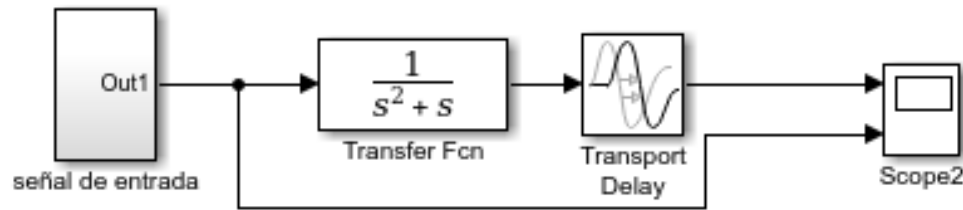


Figura 17. Diagrama de bloques de una señal integradora en simulink. Fuente: propia.

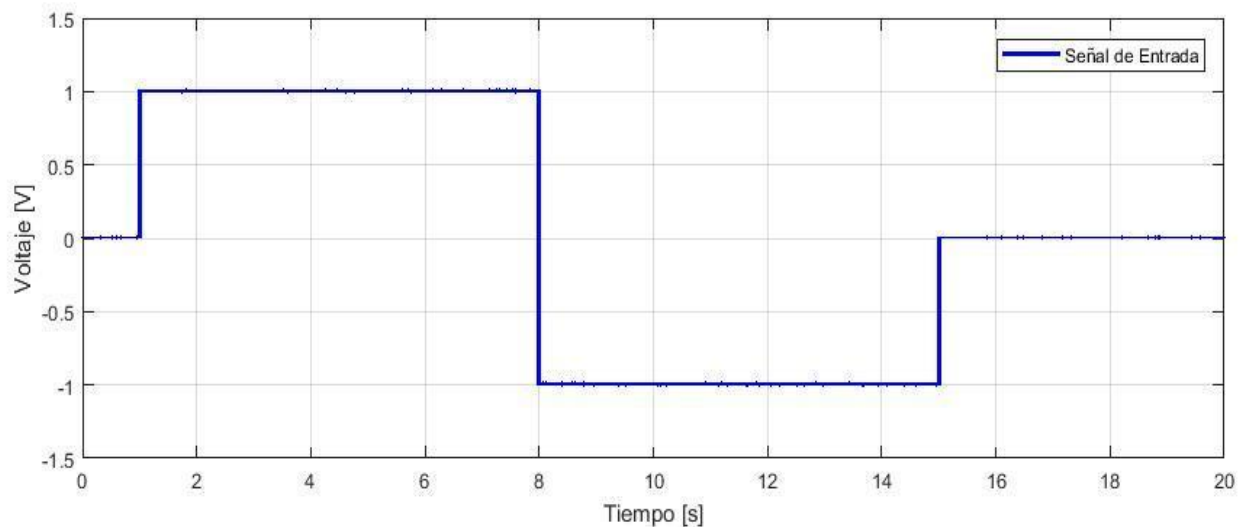


Figura 18. Señal de entrada, una suma de escalones. Fuente: propia.

Como sabemos, estamos tratando con un sistema integrador, por definición la integral es el área bajo la curva, en este caso la señal crecerá dependiendo el área bajo la curva que se encuentre en la señal de entrada.

Para tener un sistema integrador en las mejores condiciones necesitamos una señal de entrada como la anterior vista (figura 2) ya que esta señal como podemos ver, tiene área positiva y área negativa terminando la señal en 0 con esto podemos asegurar que la señal no crecerá infinitamente y aseguramos la estabilidad del sistema gracias a las características de la señal de entrada.

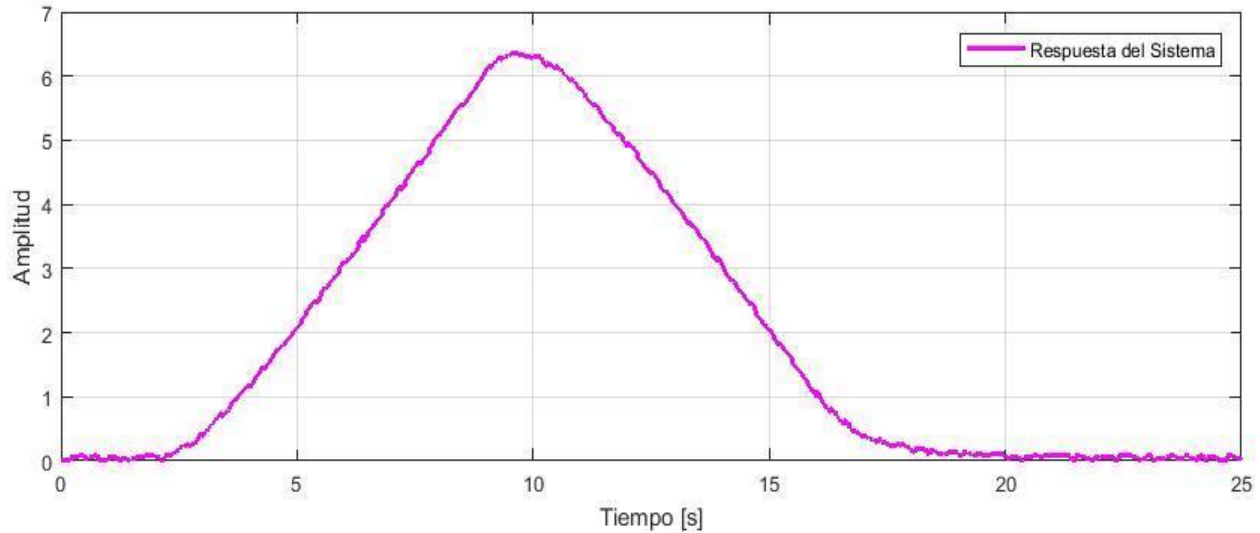


Figura 19. Respuesta del sistema integrante. Fuente: propia.

Hecho lo anterior, se empezará aplicar la técnica para caracterizar sistemas **FOPDT** como explicamos en el inicio del trabajo, consiste en derivar la respuesta del sistema integrante.

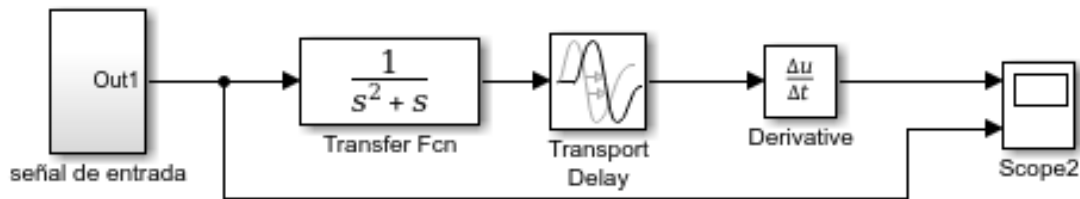


Figura 20. diagrama de bloques, respuesta integrante más el derivador. Fuente: propia.



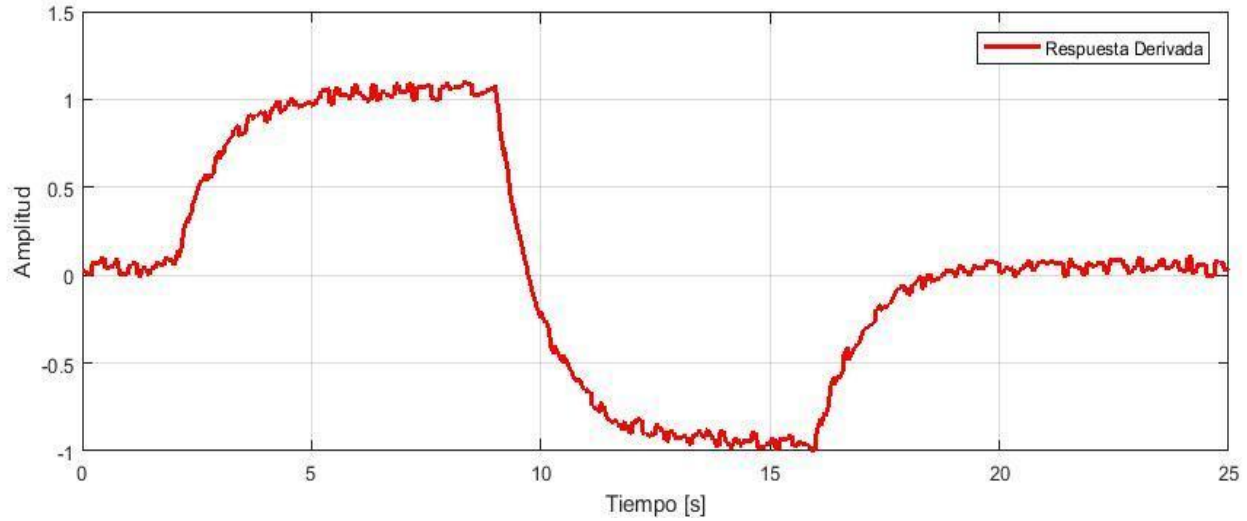


Figura 21. Respuesta. Derivada fuente: propia.

Ya con la respuesta del sistema derivada podemos caracterizar aplicando los diferentes métodos para encontrar las constantes  $\delta$ ,  $\tau$ ,  $t_0$ , luego de haber aplicado los diferentes métodos solo quitamos el bloque de derivada y dejamos la señal original correspondiente y trabajamos la función de transferencia con las constantes halladas.

A partir a la anterior respuesta podemos calcular la ganancia de la siguiente manera

$$\delta = \frac{\text{cambio en la señal de salida derivada}}{\text{cambio en la señal de entrada}}$$

$$\delta = \frac{-1-1}{-1-1} = \frac{-2}{-2} = 1 \quad (2)$$

$$\delta = 1$$

### 3.2 Caracterización

#### Método de la tangente de Ziegler Nichols

Este método permite aproximar la respuesta de un proceso a un modelo **FOPDT**.

Este método consiste en trazar una recta tangente a la curva de reacción del proceso en el punto de máxima pendiente (punto de inflexión).

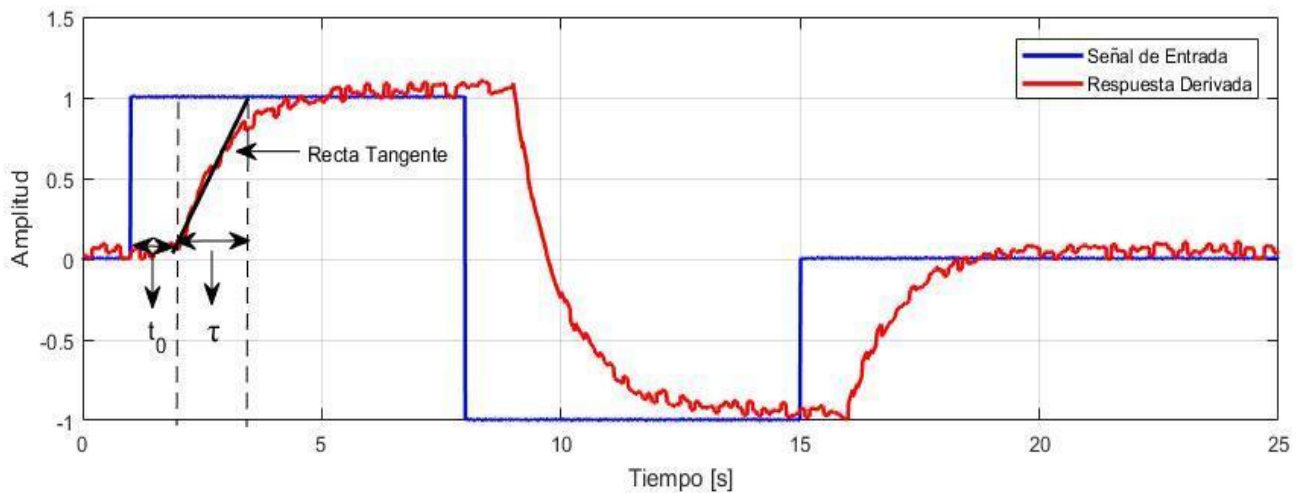


Figura 22. Señal de entrada y su respectiva salida con su línea tangente. fuente: propia.

$$\tau = 1.62$$

$$t_0 = 0.85$$

Entonces, teniendo en cuenta los datos obtenidos en el proceso integración, con el método de la tangente de Ziegler Nichols el sistema puede ser modelado como:

$$G(s) = \frac{1e^{-0.85s}}{s(1.62s+1)} \quad (3)$$

### Método de la tangente de Miller

En este método se halla de manera diferente la constante de tiempo  $t$ .

Para el cálculo de este parámetro se efectúa como la resta del valor que se proyecta en el eje tiempo cuando se llega al 63.2%.

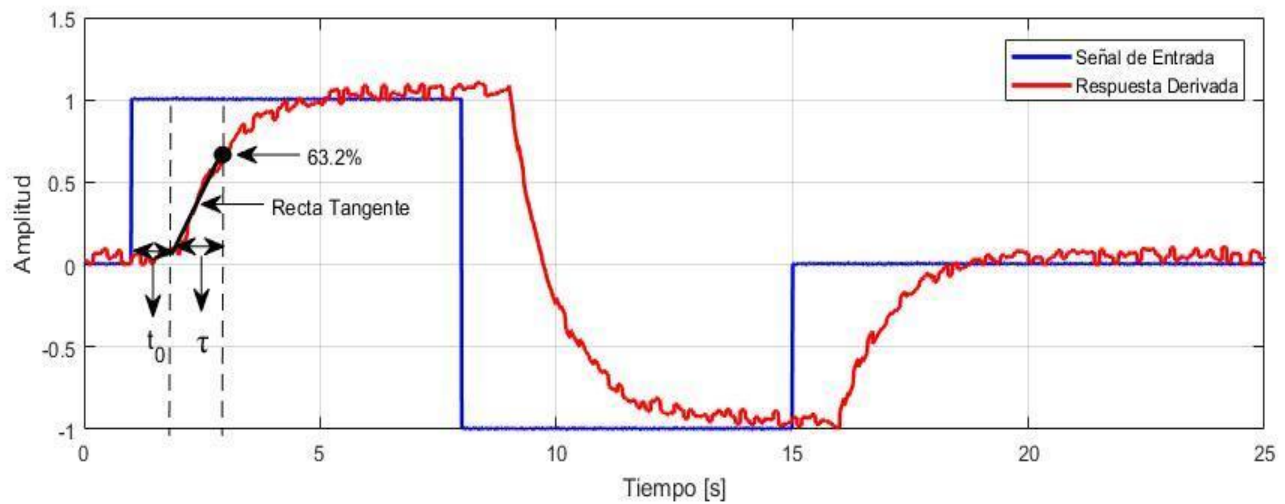


Figura 23. Señal de entrada y su respectiva salida con su línea recta en 63.2% de la respuesta. fuente: propia.

$$\tau = 1.067$$

$$t_0 = 0.83$$

Entonces, teniendo en cuenta los datos obtenidos en el proceso integración, con el método de la tangente de Miller el sistema puede ser modelado como:

$$G(s) = \frac{1e^{-0.833s}}{s(1.067s+1)} \quad (4)$$

### Método de Smith

Es la primera técnica que no requiere que se trace la recta tangente, aquí se toman dos puntos de la curva del proceso para hallar  $\tau$  y  $t_0$ .

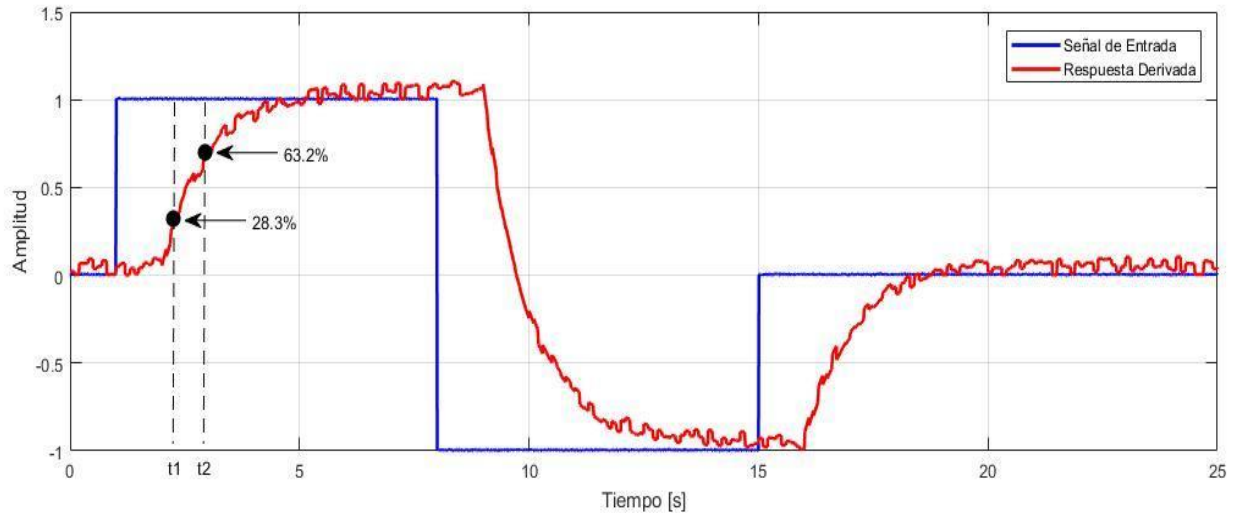


Figura 24. Señal de entrada y su respectiva salida con los puntos tomados en el 28.3% y 63.2% de la salida. fuente: propia.

Los puntos tomados son en los puntos 28.3% y 63.2% para hallar los tiempos equivalentes con las siguientes formulas.

$$t_1 = t_0 + \tau \quad (5)$$

$$t_2 = t_0 + \frac{\tau}{3} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{3}{2} + (t_2 - t_1) \quad (7)$$

$$t_0 = t_2 - \tau \quad (8)$$

$$t_2 = 2.9$$

$$t_1 = 2.24$$

A  $t_1$  y a  $t_2$  le restamos 1 ya que la señal de entrada empieza en ese tiempo

$$t_2 = 1.9$$

$$t_1 = 1.24$$

Reemplazamos  $t_1$  y  $t_2$  en ecuación (7)

$$\tau = \frac{3}{2}(1.9 - 1.24)$$

$$\tau = 0.99$$

$$t_0 = t_2 - \tau \quad (9)$$

Reemplazamos  $t_2$  y  $\tau$  en ecuación (9)

$$t_0 = 1.9 - 0.99$$

$$t_0 = 0.91$$

Entonces, teniendo en cuenta los datos obtenidos en el proceso integración, con el método de Smith el sistema puede ser modelado como:

$$G(s) = \frac{1e^{-0.91s}}{s(0.99s+1)} \quad (10)$$

### Método de Alfaro

Este método toma los valores de 25% y 75% de la curva de reacción para hallar los valores de  $\tau$  y  $t_0$ .

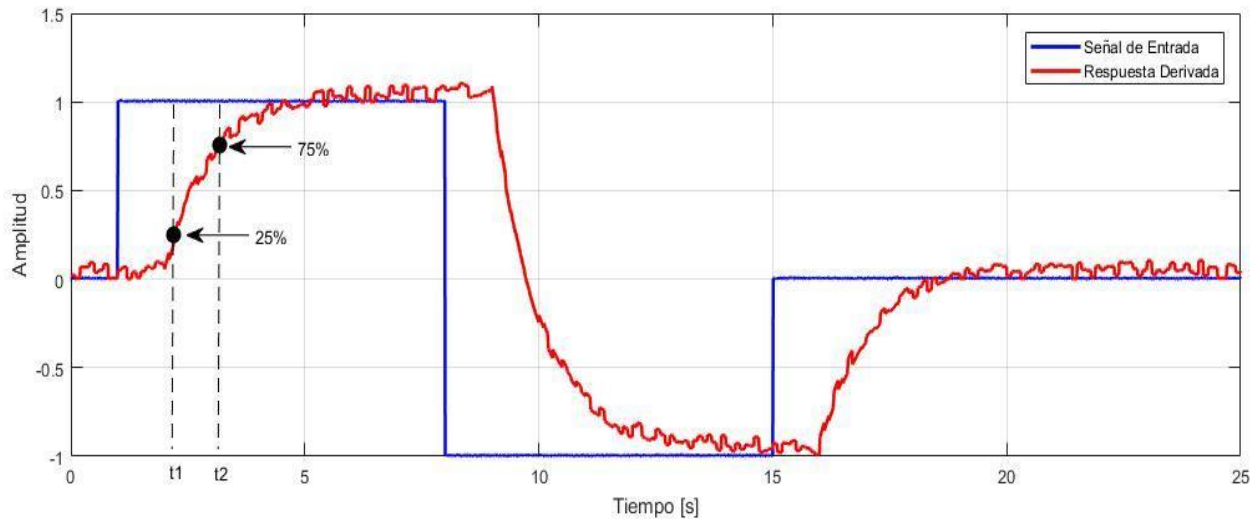


Figura 25. Señal de entrada y su respectiva salida con los puntos tomados en el 25% y 75% de la salida.  
Fuente: propia.

$$\tau = 0.9102 * (t_2 - t_1) \quad (11)$$

$$t_0 = 1.262 * t_1 - 0.262 * t_2 \quad (12)$$

$$t_2 = 3.192$$

$$t_1 = 2.206$$

A  $t_1$  y a  $t_2$  le restamos 1 ya que la señal de entrada empieza en ese tiempo

$$t_2 = 2.192$$

$$t_1 = 1.206$$

Se reemplaza  $t_1$  y  $t_2$  en la ecuación (11)

$$t = 0.9102(2.192 - 1.206)$$

$$t = 0.897$$

Se reemplaza  $t_1$  y  $t_2$  en la ecuación (12)

$$t_0 = 1.262 * 1.206 - 0.262 * 2.192$$

$$t_0 = 1.52 - 0.57$$

$$t_0 = 0.95$$

Entonces, teniendo en cuenta los datos obtenidos en el proceso integración, con el método de Alfaro el sistema puede ser modelado como:

$$G(s) = \frac{1e^{-0.95s}}{s(0.897s+1)} \quad (13)$$

### Comparación de los métodos anteriores

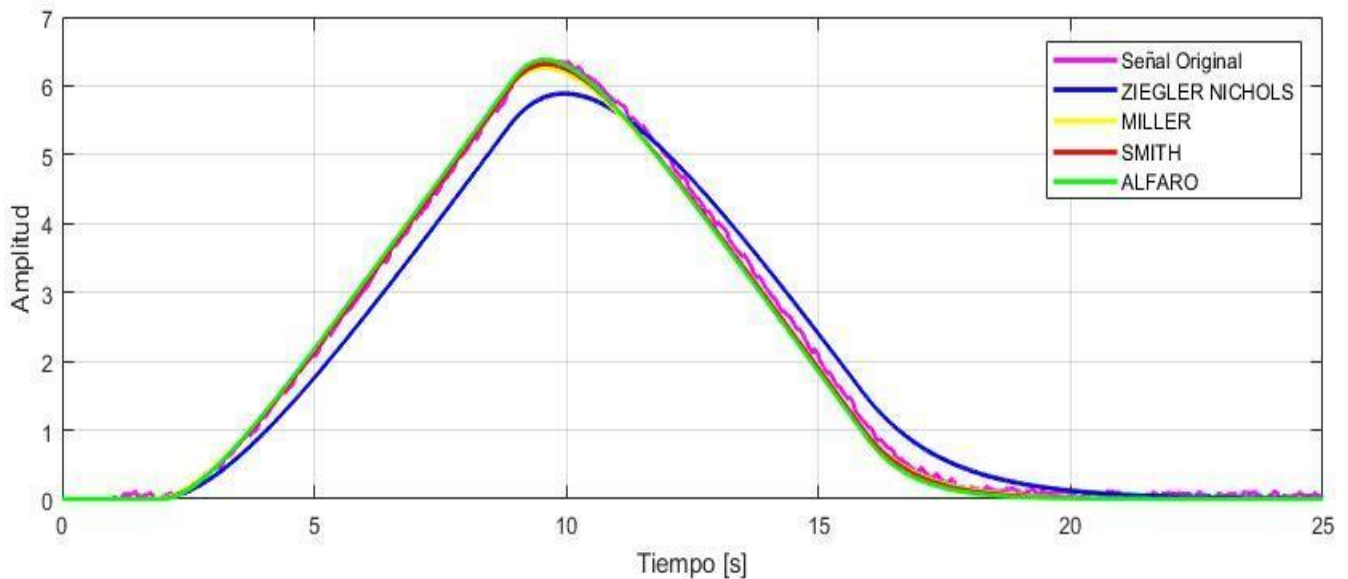


Figura 26. Comparación de todos los métodos. fuente: propia.

Tabla 4

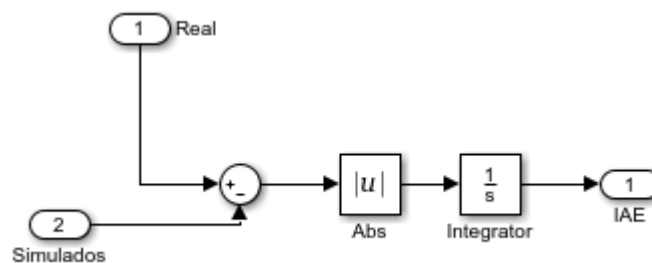
*Tabla comparativa de los parámetros de caracterización.*

METODO	$\delta$	$\tau$	$t_0$	IAE
ZIEGLER	1	1.62	0.85	5.319
MILLER	1	1.067	0.833	1.398
SMITH	1	0.99	0.91	1.249
ALFARO	1	0.897	0.95	1.857

*Fuente: propia.*

Para obtener el mejor método para la caracterización de modelos **FOPDT** no solo se basa en los valores de los parámetros ya que algunos valores pueden dar muy similar, sino que también se realiza una comparación a partir de la **Integral del valor absoluto del error** la cual nos permite saber con mayor exactitud cuál es el método que mejor se comporta de acuerdo a las características del sistema.

**Integral del valor absoluto del error** se obtuvo con Matlab de la siguiente forma:



*Figura 27. Diagrama de bloques de la Integral del valor absoluto del error. fuente: propia.*



A partir del anterior diagrama de bloque se creó el siguiente subsistema que es el implementado en la figura 29.

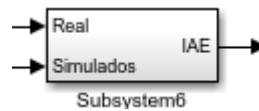


Figura 28. Subsistema de la Integral del valor absoluto del error. Fuente: propia.

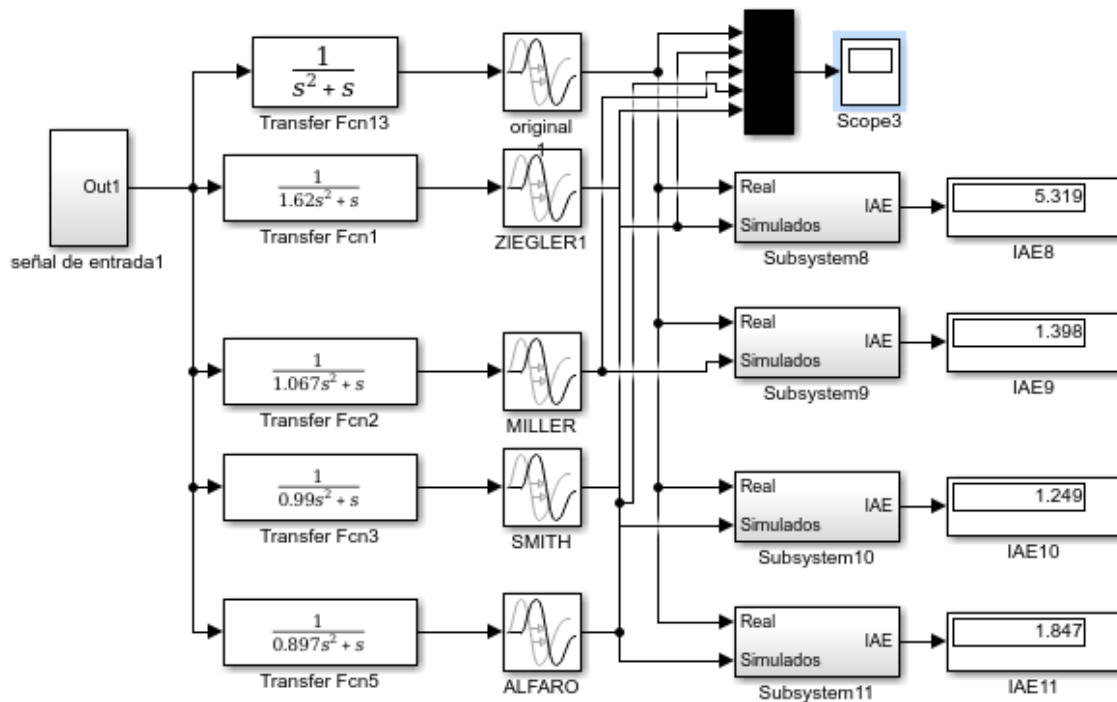


Figura 29: Diagrama de bloques para obtener la Integral del valor absoluto del error de las distintas respuestas. Fuente: propia.

El que tenga el **IAE** más bajo será el método más exacto, como podemos ver los que tienen los **IAE** más bajos son los métodos de **Smith y Miller**, por consiguiente, se utilizarán estos dos métodos de caracterización para la sintonización del sistema.

A **continuación**, se llevarán las comparaciones de los métodos a un ámbito más real aplicando estos métodos a la señal de salida de un motor DC, repitiendo los métodos vistos anteriormente y así poder comparar y escoger los mejores métodos para poder caracterizar un proceso **FOPDT**, claro está aplicado la técnica para poder caracterizar estos sistemas la cual definimos al principio del trabajo.

### **Practica con motor DC**

Los datos de esta práctica se realizaron en el laboratorio de la universidad de la costa con los siguientes equipos.

QUANSER y el NI ELVIS II, el cual estos dos equipos forman el simulador del Motor DC.



*Figura 30. QNET DC Motor Control Trainer. Fuente: propia.*

Donde a partir del anterior simulador se obtuvieron los datos de posición del Motor DC los cuales fueron cuantificados y también ilustrados por el software labview.

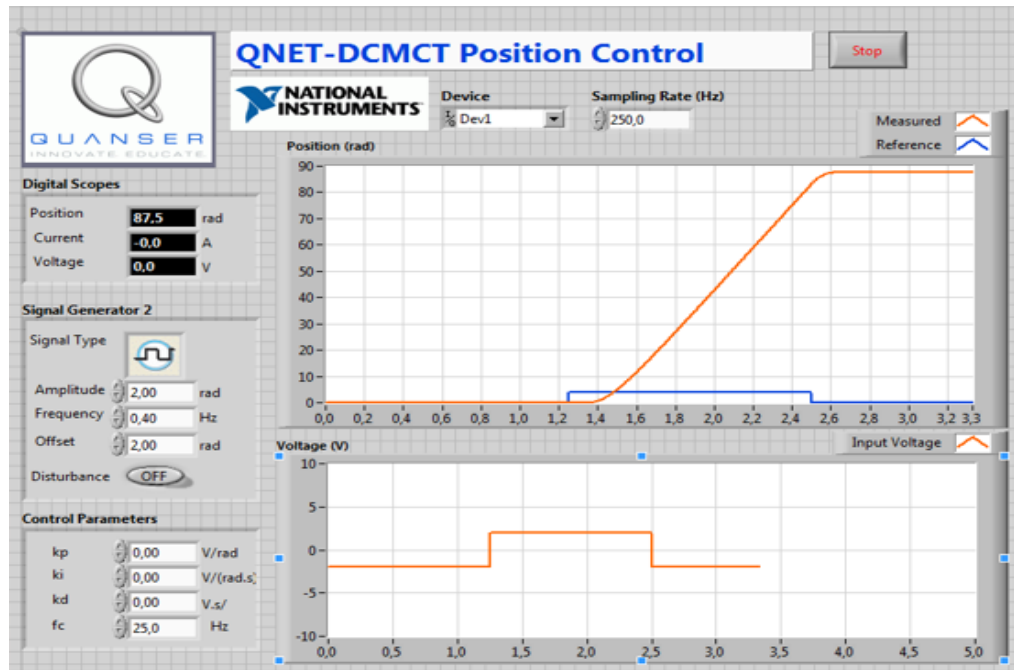


Figura 31. QNET-DCMCT control de posición. Fuente: propia.

Las gráficas obtenidas en labview fueron exportadas a Excel para luego poder ingresarlas a Matlab para tener una mejor manipulación de las mismas.

### Modelamiento.

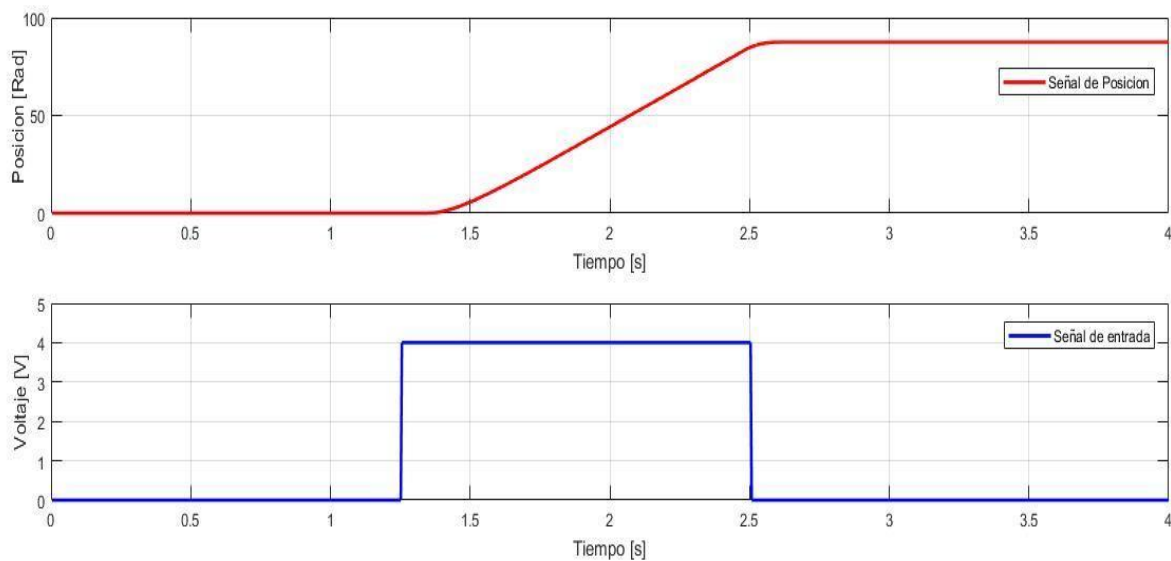


Figura 32. Modelamiento Motor DC Matlab. Fuente: propia.

Para poder manipular las señales mostradas anteriormente, del modelamiento del Motor DC obostamos por llevarlas a Matlab.

Para esta práctica se utilizó la señal de posición del motor debido a que esta posee un comportamiento integrante, la cual nos permite tomar medidas más reales y ver el comportamiento de un proceso real y así seguir validando la técnica y métodos de caracterización implementados a lo largo del texto.

Procedemos aplicar la técnica para poder caracterizar los sistemas **FOPDT** como hicimos con la señal caracterizada anteriormente.

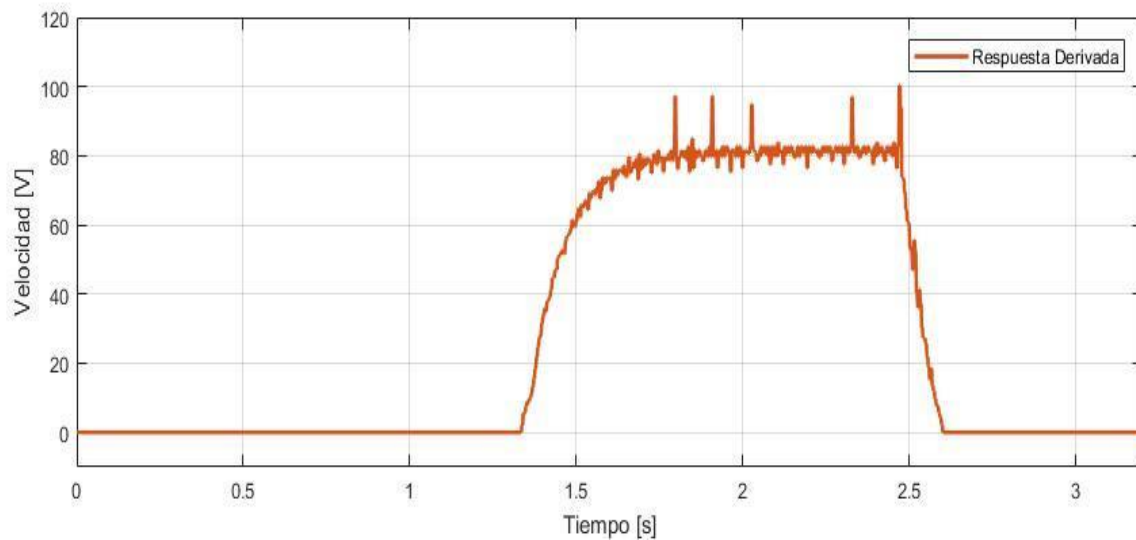


Figura 33. Señal de posición Derivada. fuente: propia.

A partir de anterior respuesta del sistema podemos calcular la ganancia de la siguiente manera.

$$\delta = \frac{\text{cambio en la señal de salida}}{\text{cambio en la señal de entrada}}$$

$$\delta = \frac{82-0}{4-0} = \frac{82}{4} = 20.5 \quad (14)$$

$$\delta = 20.5$$

### 3.3 Caracterización

#### Método de la tangente de Ziegler Nichols

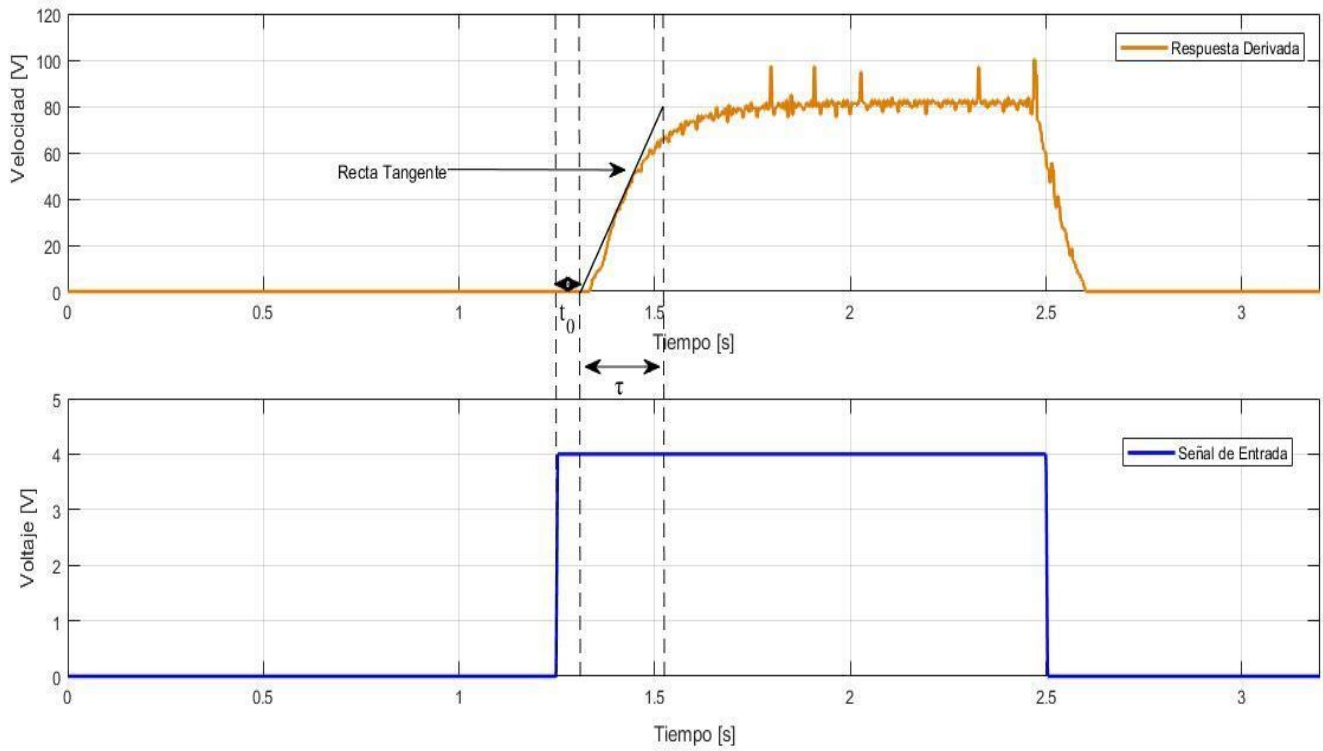


Figura 34. Método de la tangente de Ziegler Nichol. Fuente: propia.

$$\tau = 0.193$$

$$t_0 = 0.072$$

Entonces, teniendo en cuenta los datos obtenidos en el proceso integración, con Método de la tangente de Ziegler Nichols el sistema puede ser modelado como:

$$G(s) = \frac{20.5e^{-0.072s}}{s(0.193s+1)} \quad (15)$$

### Método de la tangente de Miller

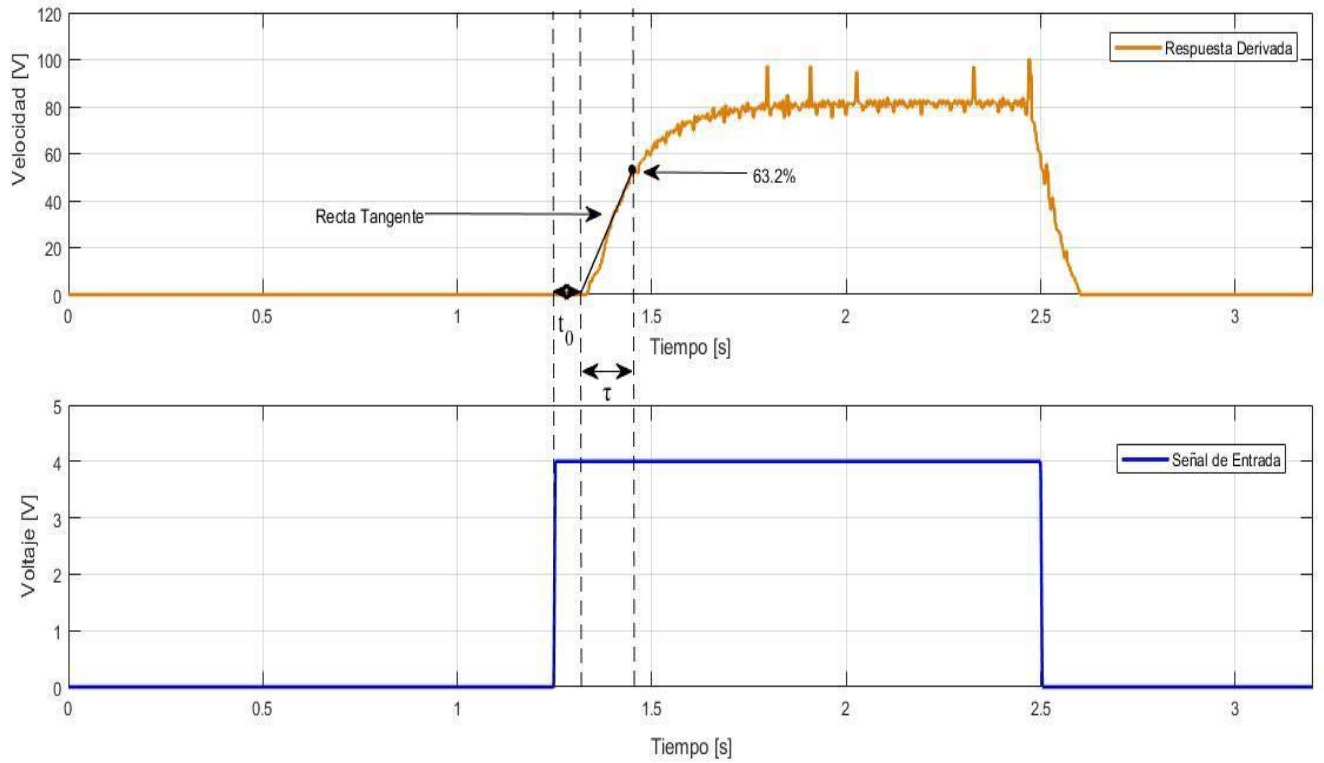


Figura 35. Método de la tangente de Miller. Fuente: propia.

$$\tau = 0.15$$

$$t_0 = 0.056$$

Entonces, teniendo en cuenta los datos obtenidos en el proceso integración, con Método de la tangente de Miller el sistema puede ser modelado como:

$$G(s) = \frac{20.5e^{-0.056s}}{s(0.15s+1)} \quad (16)$$

### Método de Smith

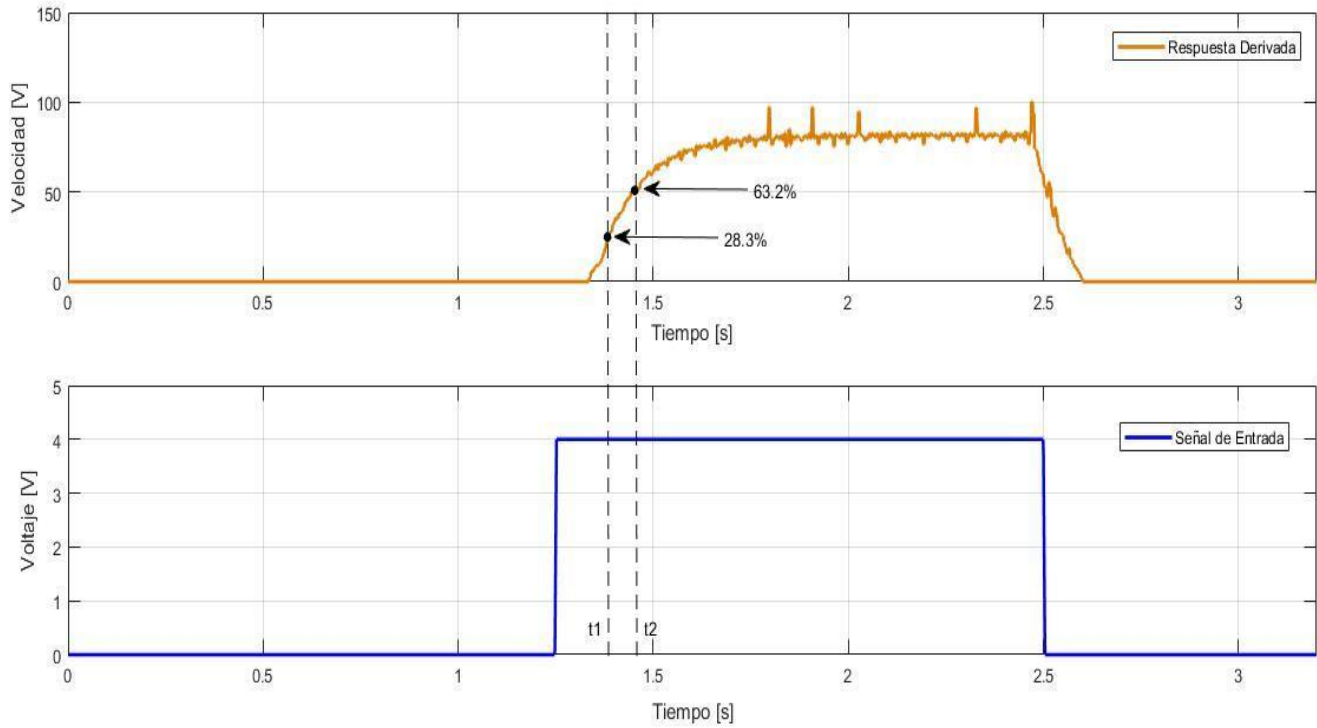


Figura 36. Método de Smith. Fuente: propia.

$$\tau = \frac{3}{2} + (t_2 - t_1) \quad (17)$$

$$t_0 = t_2 - \tau \quad (18)$$

$$t_2 = 1.454$$

$$t_1 = 1.383$$

A  $t_1$  y a  $t_2$  le restamos 1.247 ya que la señal de entrada empieza en ese tiempo

$$t_1 = 0.136$$

$$t_2 = 0.207$$

Se reemplaza  $t_1$  y  $t_2$  en la ecuación (17)

$$\tau = \frac{3}{2} + (0.207 - 0.136)$$

$$\tau = 0.15045$$

Se reemplaza  $t_1$  y  $t_2$  en la ecuación (18)

$$t_0 = 0.207 - 0.15045$$

$$t_0 = 0.05655$$

Entonces, teniendo en cuenta los datos obtenidos en el proceso integración, con Método de Smith el sistema puede ser modelado como:

$$G(s) = \frac{20.5e^{-0.05655s}}{s(0.15045s+1)} \quad (19)$$



### Método de Alfaro

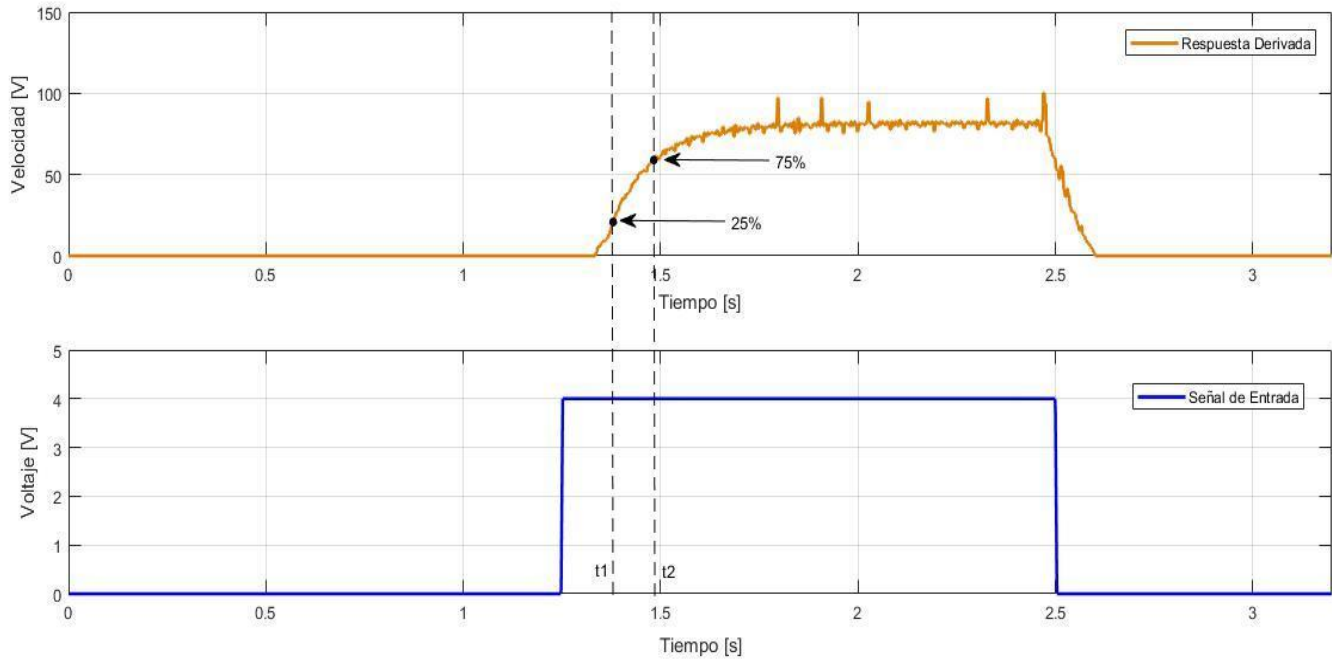


Figura 37. Método de Alfaro. Fuente: propia.

$$\tau = 0.9102 * (t_2 - t_1) \quad (20)$$

$$t_0 = 1.262 * t_1 - 0.262 * t_2 \quad (21)$$

$$t_1 = 1.379$$

$$t_2 = 1.499$$

A  $t_1$  y a  $t_2$  le restamos **1.247** ya que la señal de entrada empieza en ese tiempo

$$t_1 = 0.132$$

$$t_2 = 0.252$$

Se reemplaza  $t_1$  y  $t_2$  en la ecuación (20)

$$\tau = 0.9102 * (0.252 - 0.132)$$

$$\tau = 0.109$$

Se reemplaza  $t_1$  y  $t_2$  en la ecuación (21)

$$t_0 = 1.262 * 0.132 - 0.262 * 0.252$$

$$t_0 = 0.1665 - 0.0660$$

$$t_0 = 0.1005$$

Entonces, teniendo en cuenta los datos obtenidos en el proceso integración, con Método de Alfaro el sistema puede ser modelado como:

$$G(s) = \frac{20.5e^{-0.1005s}}{s(0.109s+1)} \quad (22)$$

### Comparación de los métodos anteriores

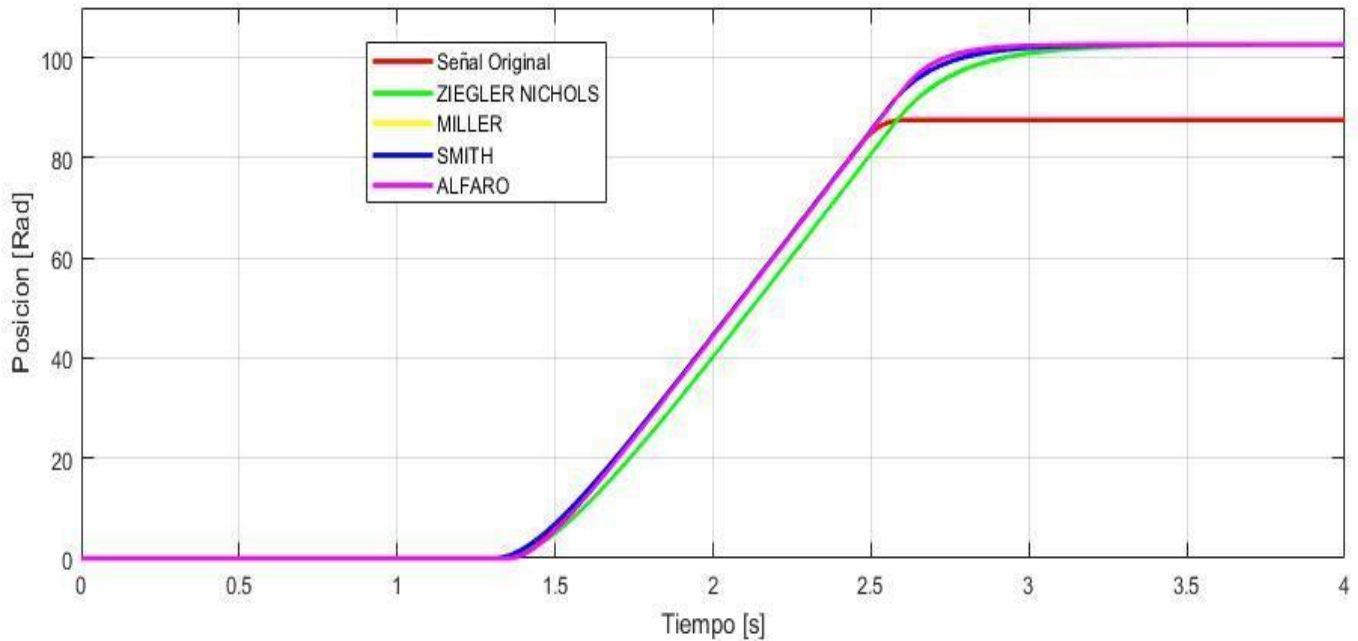


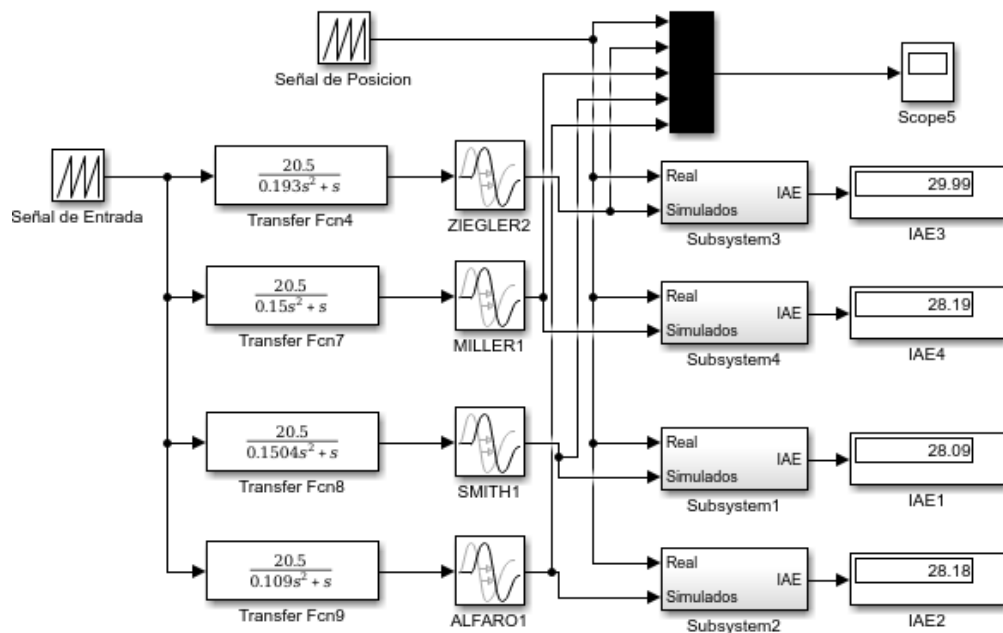
Figura 38. Respuesta de la Comparación de todos los métodos. Fuente: propia.

Tabla 5

*Tabla comparativa de los parámetros de caracterización, Motor DC.*

METODO	$\Delta$	$\tau$	$t_0$	IAE
ZIEGLER	20.5	0.193	0.072	29.99
MILLER	20.5	0.15	0.056	28.19
SMITH	20.5	0.1504	0.05655	28.09
ALFARO	20.5	0.109	0.1005	28.18

*Fuente:propia*



*Figura 39. Diagrama de bloques para obtener la Integral del valor absoluto del error. fuente: propia.*

Como podemos observar el modelo propuesto es viable ya que las señales resultantes son muy parecidas a la original la cual podemos trabajar sin ningún inconveniente, con el diagrama anterior nos podemos dar cuenta, gracias al porcentaje de error, cual es el método más óptimo para caracterizar. En este caso los métodos más convenientes son los métodos de **Smith y Miller**.

Entonces para la caracterización de un sistema integrante **FOPDT** podemos aplicar el proceso anterior y obtener unos datos óptimos del proceso, para un posterior control.

### Métodos de sintonización para sistemas de integración pura mas (FOPDT)

A continuación, le aplicaremos el control a la señal de posición del **Motor DC** con la que venimos trabajando, (**figura 16: Modelamiento Motor DC Matlab**).

El modelo de control propuesto se dedujo en busca de cerrar el bucle equivalente a la que resulta de un sistema de integración puro FOPDT controlado por un controlador PI. El controlador propuesto es un controlador PD.

Se aplicará los diferentes métodos de sintonización ante las diferentes formas de control para ver cual tiene una mejor reacción ante estos sistemas integrantes.

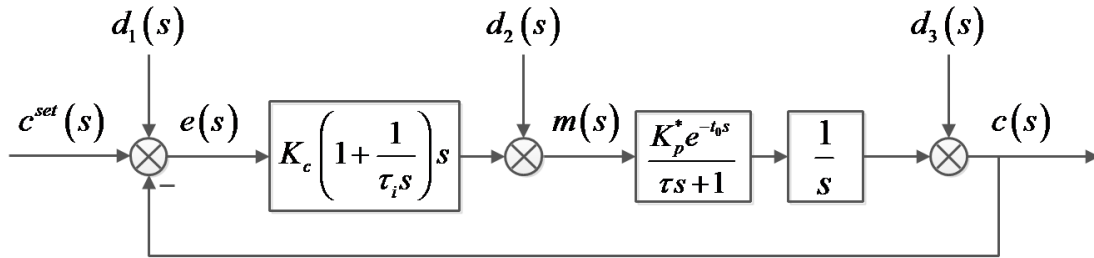


Figura 40. Diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado propuesto. Fuente: propia.

Primero se desarrolla la ecuación que se encuentra en el primer bloque.

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= \left(s + \frac{1}{\tau_i}\right)k_c & (23) \\
 &= \left(k_c s + \frac{k_c}{\tau_i}\right) = \frac{k_c s * \tau_i + k_c}{\tau_i} \\
 &= \frac{k_c s \tau_i}{\tau_i} + \frac{k_c}{\tau_i}
 \end{aligned}$$

Se llevará la ecuación de tal manera que tome la forma de un control PD.

$$G_c(s) = \frac{K_c}{\tau_i} + \frac{K_c}{\tau_i} \tau_i s$$

Luego se factoriza la ecuación buscando la forma del control PD.

$$G_c(s) = \frac{K_c}{\tau_i} (1 + \tau_i s)$$

Donde esta fórmula equivale al controlado PD

$$K_c^{\wedge} (1 + \tau_D^{\wedge} s) \quad (24)$$

Entonces

$$K_c^{\wedge} = \frac{K_c}{\tau_i} \quad (25)$$

$$\tau_D^{\wedge} = \tau_i \quad (26)$$

A partir de estas ecuaciones se buscará encontrar las ecuaciones para el tipo de controlador propuesto a partir del controlador PI.

### Métodos de sintonización de lazo abierto

Para la sintonización se obtendrá los valores de la **caracterización de Smith** ya que fue la de menor margen de error.

Donde los constantes de la caracterización de Smith fueron:

$$\delta = 20.5$$

$$\tau = 0.1504$$

$$t_0 = 0.05655$$

#### 3.3.1 Sintonización método de Ziegler Nichols

Donde las ecuaciones para un controlador PI son:

$$k_p = \frac{0.9}{\delta t_0} \quad (27)$$

$$T_i = \frac{t_0}{0.3} \quad (28)$$

A partir de estas ecuaciones se va a encontrar las ecuaciones del controlador propuesto (PD).

Igualando de tal forma que la ganancia y el tiempo sean equivalentes las ecuaciones (23) y (24).

$$K_c = \frac{\frac{0.9\tau}{\delta t_0}}{\frac{t_0}{0.3}} \quad (29)$$

$$\tau_D = \frac{t_0}{0.3} \quad (30)$$

$$\tau = 0.1504$$

$$t_0 = 0.05655$$

Reemplazando en las ecuaciones (27) y (28) para el control PI.

$$k_p = \frac{0.9(0.1504)}{20.5(0.05655)} = \frac{0.13536}{1.1592} = 0.116$$

$$T_i = \frac{t_0}{0.3} = \frac{0.05655}{0.3} = 0.1886$$

Reemplazando en las ecuaciones (29) y (30) para el control PD.

$$K_c = \frac{\frac{0.9t}{\delta t_0}}{\frac{t_0}{0.3}} = \frac{0.116}{0.1886} = 0.619$$

$$\tau_D = \frac{t_0}{0.3} = 0.1886$$

De igual manera se pueden hallar los valores para el tipo de controlador propuesto (PD) a partir del controlador PI como se vio anteriormente.

Tabla 6

*Fórmulas de los métodos de sintonización evaluados en este trabajo.*

METODO DE SINTONIZACIÓN	TIPO DE CONTROLADOR	$K_p$	$T_i$	$T_D$
Ziegler Nichols (Lazo abierto)	P	$\frac{t}{\delta t_0}$		
	PD	$\frac{0.9t}{\delta t_0} \frac{t_0}{0.3}$		$\frac{t_0}{0.3}$
Cohen Coob (Lazo abierto)	P	$\frac{\tau}{\delta t_0} \left[ 1 + \frac{t_0}{3\tau} \right]$		
	PD	$\frac{\frac{\tau}{\delta t_0} \left[ 0.9 + \frac{t_0}{12\tau} \right]}{t_0 \frac{30 + 3t_0/\tau}{9 + 20t_0/\tau}}$		$t_0 \frac{30 + 3t_0/\tau}{9 + 20t_0/\tau}$
Lambda	P	$k_c = \frac{t}{\delta * t_0}$		
	PD	$k_c = \frac{\frac{t}{\delta(t_0 * 2)}}{t}$		$t$

*Fuente: propia.*



Tabla 7

*Resultado de los métodos de sintonización evaluados.*

<b>METODO DE SINTONIZACIÓN</b>	<b>TIPO DE CONTROLADOR</b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>T_i</math></b>	<b><math>T_D</math></b>	<b>IAE</b>
Ziegler Nichols	P	0.129			36
(Lazo abierto)	PD	0.619		0.1886	7.549
Cohen Coob	P	0.146			39.29
(Lazo abierto)	PD	0.1126		0.1065	39.16
Lambda	P	0.1397			33.92
	PD	0.4355		0.065	11.64

*Fuente: propia.*

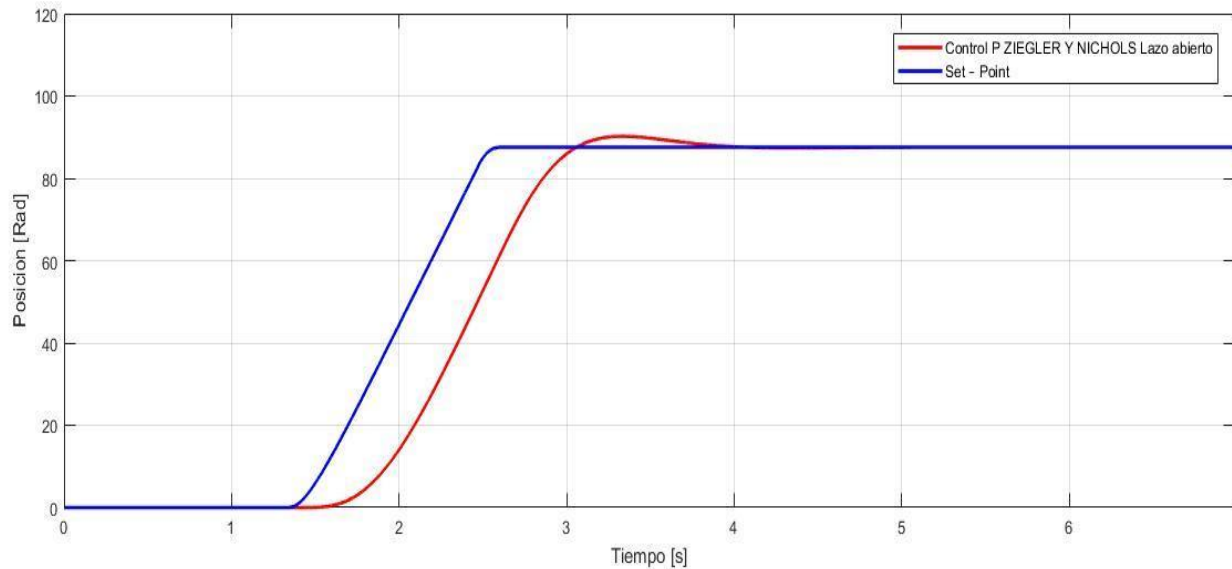
**Respuestas de los controladores descritos en la tabla 6****Control P Ziegler y Nichols lazo abierto**

Figura 41. Respuesta del sistema con el control P Ziegler y Nichols lazo abierto. Fuente: propia.

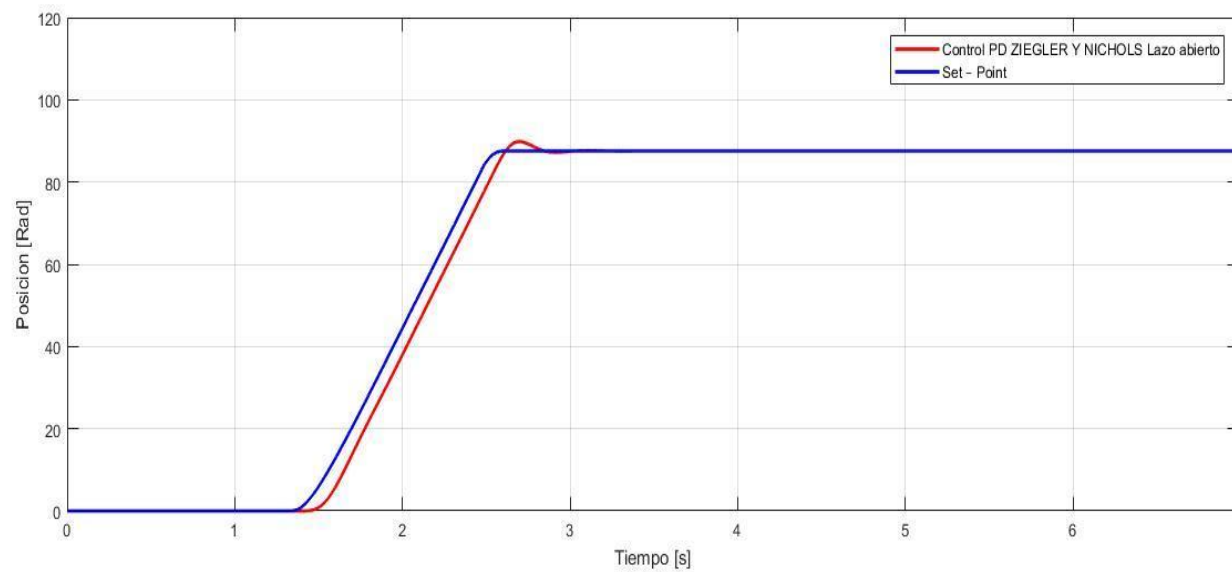
**Control PD Ziegler y Nichols lazo abierto**

Figura 42. Respuesta del sistema con el control PD Ziegler y Nichols lazo abierto. Fuente: propia.

## Control P Cohen Coob lazo abierto

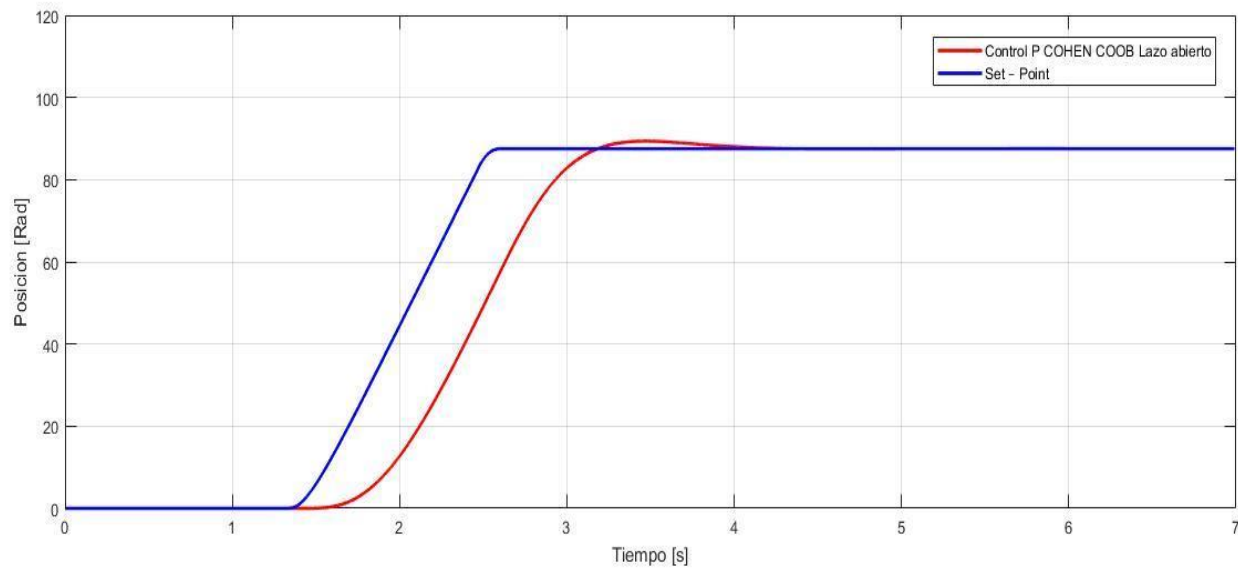


Figura 43. Respuesta del sistema con el control P Cohen Coob lazo abierto. Fuente: propia.

## Control PD Cohen Coob lazo abierto

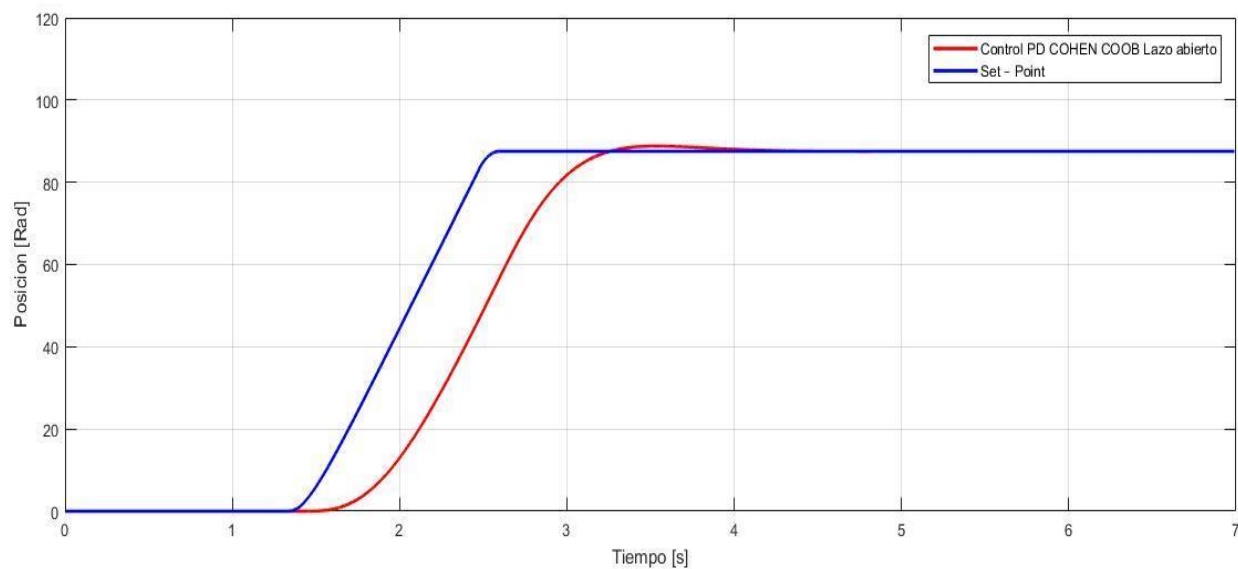


Figura 44. Respuesta del sistema con el control PD Cohen Coob lazo abierto. Fuente: propia.

## Control P sintonización Lambda

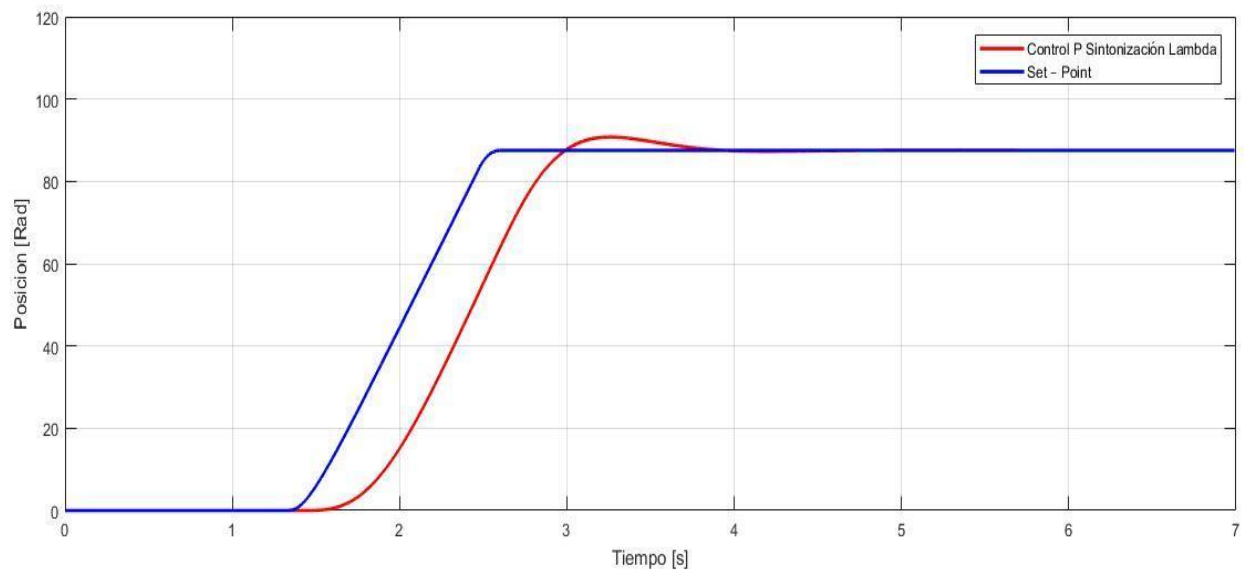


Figura 45. Respuesta del sistema con el control P sintonización Lambda. Fuente: propia.

## Control PD sintonización Lambda

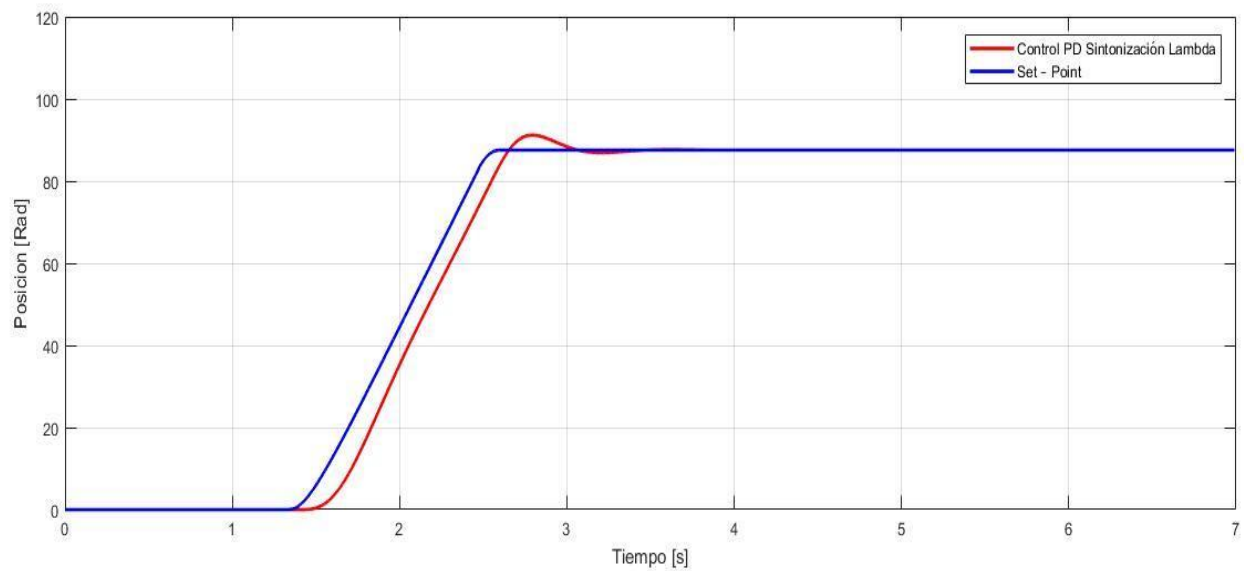


Figura 46. Respuesta del sistema con el control PD sintonización Lambda. Fuente: propia.

Colocando a prueba los 3 métodos de sintonización anteriormente descritos nos damos cuenta que las respuestas con menor error las encontramos en la sintonización de Ziegler y Nichols y lambda más el sistema de control PD con mejor reacción y el menor error.

**En conclusión,** para estos sistemas integrantes el sistema de control recomendado es el control PD.

**A continuación,** Remplazaremos el sistema de control de posición de un motor DC con el sistema de control propuesto en este trabajo, teniendo en cuenta que el control de posición del motor DC se le puede aplicar control P, PD y PID así que la respuesta de nuestro sistema será comparada con la respuesta de esos tres controles.

#### Control P Actual del Motor DC

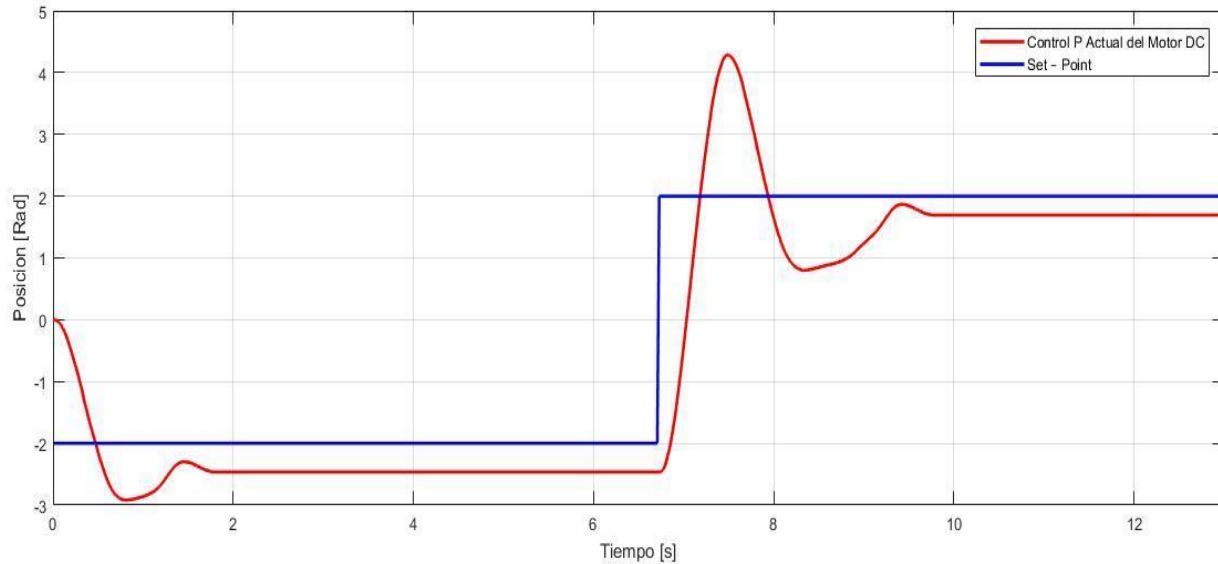


Figura 47. Respuesta del sistema con el control P Actual del Motor DC. Fuente: propia.

## Control PD Actual del Motor DC

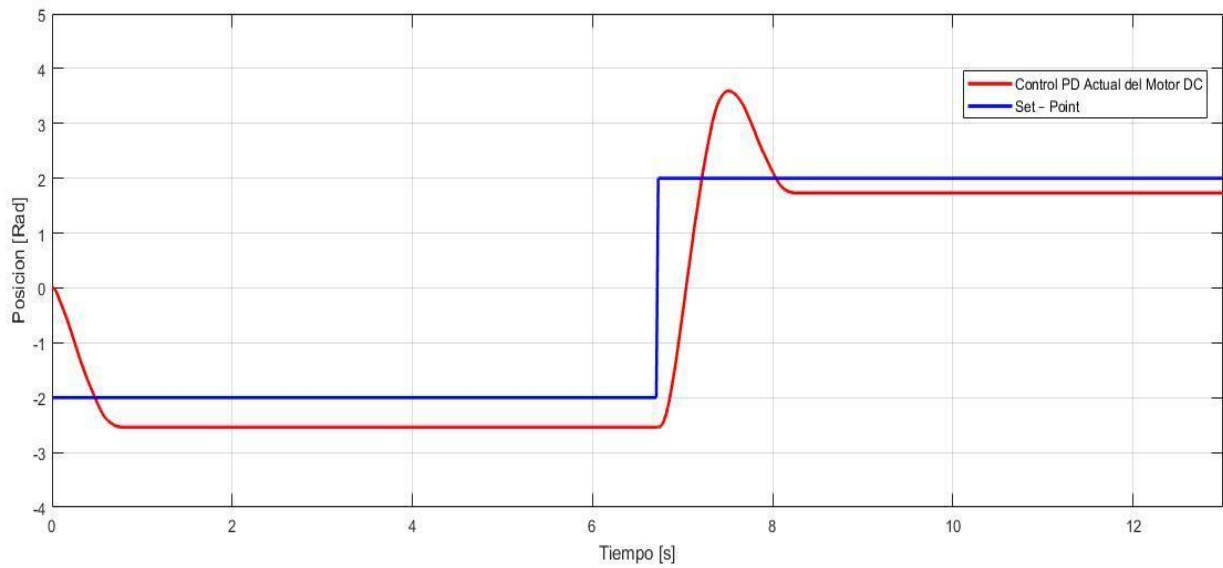


Figura 48. Respuesta del sistema con el control PD Actual del Motor DC. Fuente: propia.

## Control PID Actual del Motor DC

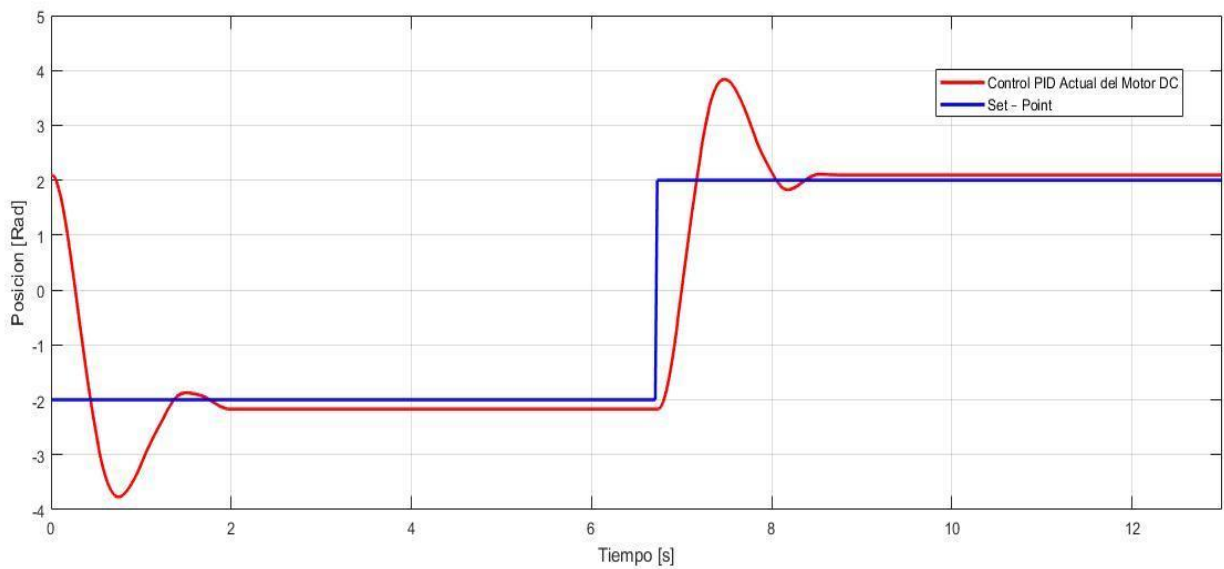


Figura 49. Respuesta del sistema con el control PID Actual del Motor DC. Fuente: propia.

## Control PD propuesto

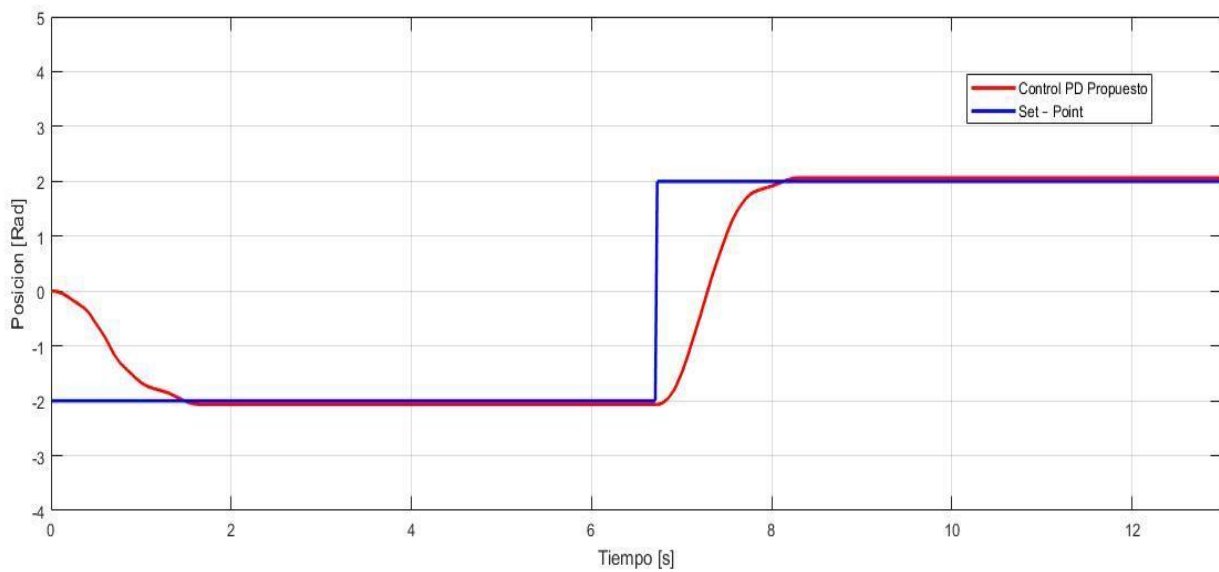


Figura 50. Respuesta del sistema con el control PD propuesto. Fuente: propia.

Tabla 8

IAE de los diferentes controladores.

Control	P Actual	PD Actual	PID Actual	PD propuesto
IAE	8.291	7.287	5.453	4.421

Fuente: propia.

Como podemos observar en las respuestas del sistema motor y en la tabla anterior la acción de control más eficiente es la propuesta, por consiguiente, el modelo propuesto por este trabajo es viable para estos sistemas integrantes ya que se ha validado e implementado en un sistema real y se han obtenidos resultados favorables.

### Conclusiones

La implementación del método de la identificación y caracterización para los sistemas integrantes de primer orden más tiempo muerto, consta en derivar la señal integrante y aplicar un método de caracterización para obtener los valores de las constantes y encontrar la dinámica del proceso o la función de transferencia que modela el sistema , donde la caracterización utilizada para ese proceso es la caracterización de Smith ya que en las pruebas de comparación realizadas contra los otros métodos de caracterización tales como la caracterización de Ziegler y Nichols ,la caracterización de Alfaro y la caracterización de Miller , la caracterización de Smith es la que obtuvo el menor error con respecto con a la respuesta que modela el sistema.

Las pruebas realizadas en el hardware QUANSER Motor Control Trainner y las pruebas simuladas demuestran que el método propuesto tiene fiabilidad, por un lado en las simulaciones realizadas en Matlab al comparar la señal de posición obtenida del motor DC con la señal de respuesta de la función de transferencia obtenida con los datos de la identificación y caracterización propuesta son muy similares , también se aplicó este método de derivar la respuesta del sistema y aplicar la caracterización de Smith a un sistema de posición real QUANSER Motor Control Trainner donde se obtuvieron resultados muy favorables siendo así, que el resultado del control tras haber obtenido las características del sistema integrante con la metodología propuesta, la respuesta del sistema tiene un mejor comportamiento con respecto a las respuestas obtenidas por los métodos matemáticos convencionales que tiene el QUANSER Motor Control Trainner, esto quiere decir que al aplicar la identificación ,caracterización propuesta la señal no



presenta diferencias significativas con respecto a la original, al ocurrir esto, el método se puede tomar como base para determinar la dinámica de los procesos integrantes.

Para la implementación de un control se debe escoger un método de sintonización, obteniendo así los parámetros óptimos para la implementación del mismo.

A partir de los datos de la respuesta del sistema o el modelo del sistema obtenido en la caracterización, se compararon los métodos de sintonización de Ziegler y Nichols lazo abierto, Cohen Coob lazo abierto y la sintonía lambda, donde la sintonía con mejor respuesta en base a las pruebas realizadas fue la de Ziegler y Nichols de lazo abierto.

Para los sistemas integrantes de primer orden más tiempo muerto se determinó la implementación de con un controlador **PD** ya que el sistema integrante tiene implícita en su función de transferencia una ganancia integral es por esa razón que en las gráficas de las respuestas no se presenta error en estado estacionario, por ende, no se aplican otros controles como el **PI** o el **PID** esto haría que el sistema fuera más lento y con más sobre amortiguamiento, de tal manera que el control que se recomiendan normalmente para estos sistemas son el control **P**, siendo así en este trabajo proponemos el control **PD** ya que este control hace la respuesta del sistema más rápida y anula el sobre pico causado por el control **P** de tal manera que la respuesta del sistema se estabiliza en menor tiempo,

Basado en las comparaciones que se realizaron con los controles **P** y **PD** simuladas en Matlab y también con datos reales con el sistema de posición QUANSER Motor Control Trainner la respuesta del sistema con el control **PD** tubo mejor desempeño que la respuesta del sistema aplicando el control **P**, siendo así el control que mejor se comporta para los sistemas integrantes sea control **PD**.

### Referencias

- Akshay, N., & Subbulekshmi, D. (2017). Online Auto Selection of Tuning Methods and Auto Tuning PI Controller in FOPDT Real Time Process-pH Neutralization. *Energy Procedia*, 117, 1109–1116.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.235>
- Alberino, S., Folino, P., Verrastro, C., & Gomez, J. C. (2011). Criterios de Sintonización y Estabilidad del Control dEWMA-PID. XIV Reunión de Trabajo En Procesamiento de La Información y Control, 96–101.
- Alfaro Ruíz, V. M. (2011). Identificación De Procesos Sobreamortiguados Utilizando Técnicas De Lazo Abierto. *Revista Ingeniería*, 11(1–2).  
<https://doi.org/10.15517/ring.v11i1-2.605>
- Alfaro, V. M. . (2017). *Sistemas de control*. 171.
- Aracil, J., & Gordillo, F. (1995). *Dinámica de sistemas*. Isdefe Madrid.
- Arántegui, J. (2011). *Control de procesos*. Universidad de Lleida. España. Recurso Web.
- Araújo, R. de B., Jeronymo, D. C., Coelho, A. A. R., & Gomes, F. J. (2015). PIPIMC: Computational Tool for Teaching FOPDT Model Identification and PI-IMC Tuning. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29), 70–75.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.215>
- Atiç, S., & Kaya, İ. (2017). Generalized stability boundary locus for PI controller design for controlling integrating processes with dead time. 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 817–822. IEEE.
- Azamfar, M., Amiri, A., & Olilo, D. A. (2014). Development of the tuning formula for unstable first order processes with time delay. 2014 Second RSI/ISM International

Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), 926–929.

<https://doi.org/10.1109/ICRoM.2014.6991023>

Betancor, C., Cerezo, J., & Vega, A. (1970). Diseño de un sistema de control de temperatura.

Bueno, Á. M. (2011). Identificación experimental de sistemas. *Sistemas de Control Automático*.

Camacho, O. E., Rojas, R. D., Garcia, W. M., & Alvarez, A. (1998). Sliding mode control: a robust approach to integrating systems with dead time. *Proceedings of the 1998 Second IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems. ICCDCS 98. On the 70th Anniversary of the MOSFET and 50th of the BJT. (Cat. No.98TH8350)*, 401–406. <https://doi.org/10.1109/ICCDSCS.1998.705872>

Chidambaram, M., & Saxena, N. (2018). Tuning rules for PID controllers for unstable systems. *Advances in Industrial Control*, pp. 151–165. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7727-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7727-2_8)

Corporation, N. I. (2019a). ¿Qué es LabVIEW? Retrieved from [http://www.ni.com/es-co/shop/labview.html?cid=Paid\\_Search-135945-Rest\\_of\\_Latam-Google\\_ESW1\\_LabVIEW\\_Broad&s\\_kwid=AL!6304!3!243941345032!b!!g!!%2Bla-bview&gclid=CjwKCAjw-7LrBRB6EiwAhh1yXxDdmz9bCoT2wLsKcIsxduNB5t9ttMrG119\\_Ng94gQZK0yW1LN195RoC2eQQA\\_vD\\_BwE](http://www.ni.com/es-co/shop/labview.html?cid=Paid_Search-135945-Rest_of_Latam-Google_ESW1_LabVIEW_Broad&s_kwid=AL!6304!3!243941345032!b!!g!!%2Bla-bview&gclid=CjwKCAjw-7LrBRB6EiwAhh1yXxDdmz9bCoT2wLsKcIsxduNB5t9ttMrG119_Ng94gQZK0yW1LN195RoC2eQQA_vD_BwE)

Corporation, N. I. (2019b). Quanser QNET DC Motor Board 2.0 for NI ELVIS II/II+. Retrieved from <http://www.ni.com/es-co/support/model.quanser-qnet-dc-motor-board-2-0-for-ni-elvis-ii-ii-.html>

Cvejn, J. (2009). Sub-optimal PID controller settings for FOPDT systems with long dead

- time. *Journal of Process Control*, 19(9), 1486–1495.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2009.07.002>
- Distefano, J. J., Stubberud, A. R., & Williams, I. J. (1995). *Retroalimentación y sistemas de control* (Vol. 2). McGraw-Hill.
- Dulhoste, J. (2013). *Introducción al control de procesos para ingenieros*. Mérida–Venezuela.
- García, P., & Albertos, P. (2008). A new dead-time compensator to control stable and integrating processes with long dead-time. *Automatica*, 44(4), 1062–1071.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.08.022>
- Gaviño, R. H. (2010). *Introducción a los sistemas de control*. (Luis Miguel Cruz Castillo, Ed.). Retrieved from [http://lcr.uns.edu.ar/fcr/images/Introduccion a Los Sistemas de Control.pdf](http://lcr.uns.edu.ar/fcr/images/Introduccion%20a%20Los%20Sistemas%20de%20Control.pdf)
- Gutierrez, F. M.-H. & A. (2018). *Modelado de un motorDC*. 1–21.
- Hambali, N., Janin, Z., Samsudin, N. S. M., & Ishak, A. A. (2013). Process controllability for air temperature oven system using open-loop Reformulated Tangent Method. 2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICSIMA.2013.6717963>
- Hernández Gaviño, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con matlab*.
- Kadam, S. D., & Waghmare, L. M. (2013). Control of integrating processes with dead-time using PID controllers with disturbance observer based smith predictor. 1265–1269. <https://doi.org/10.1109/CCA.2013.6662926>
- Kaya, I. (2018). I-PD Controller Design for Integrating Time Delay Processes Based on Optimum Analytical Formulas. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 575–580.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.157>

Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. Pearson Educación.

Kurniawan, I., Cahyadi, A. I., & Ardiyanto, I. (2019). Tuning fractional order proportional integral derivative controller for DC motor control model using cross-entropy method. 351–356. <https://doi.org/10.1109/ICITISEE.2018.8721016>

Liu, T., & Gao, F. (2010). Closed-loop step response identification of integrating and unstable processes. *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE*, 65(10), 2884–2895. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.01.013>

Madady, A., & Reza-Alikhani, H.-R. (2012). Stabilization of control loops consisting of FOPDT process and parameter-dependent PID controller. *Journal of Process Control*, 22(9), 1688–1701. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2012.07.001>

Majhi, S., & Atherton, D. P. (2015). A novel identification method for time delay processes. 2299–2304. Retrieved from <https://www2.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84930607057&partnerID=40&md5=56cf7185a29ef882991db78397d9b318>

Maldonado, D. (2017). *Métodos de sintonización de controladores pid*. 3. Retrieved from <https://catedras.facet.unt.edu.ar/controldeprocesos/wp-content/uploads/sites/85/2016/02/Tabla-Metodos-de-Sintonizacion-2017.pdf>

Martínez, R. F. T. (2011). Evaluación del desempeño de métodos experimentales de identificación a lazo abierto. *Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 32(2), 50–64.

Mok, H. S., Kim, G. T., Park, M. H., & Rhew, H. W. (1988). PI controller gains tuning of the pressure control system by open-loop frequency response (thermal power plants). Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting,

- 557–561 vol.1. <https://doi.org/10.1109/IAS.1988.25115>
- Moreno, L., Garrido, S., & Balaguer, C. (2003). Ingeniería de control. Modelado, Análisis y Control de Sistemas Dinámicos.
- Moreno, M. A. (2001). Apuntes de control PID. La Paz Enero, 8, 6–7. Retrieved from [http://sites.google.com/site/startdownloadnet/Control.Pid.pdf%5Cnhttp://www.elai.upm.es:8009/spain/Asignaturas/ControlProcesos/archivos/Practicas/Practica\\_1.pdf](http://sites.google.com/site/startdownloadnet/Control.Pid.pdf%5Cnhttp://www.elai.upm.es:8009/spain/Asignaturas/ControlProcesos/archivos/Practicas/Practica_1.pdf)
- Panda, R. C. (2009). Synthesis of PID controller for unstable and integrating processes. Chemical Engineering Science, 64(12), 2807–2816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.02.051>
- Pandey, S., & Majhi, S. (2017). Limit cycle-based exact estimation of FOPDT process parameters under input/output disturbances: a state-space approach. International Journal of Systems Science, 48(1), 118–128. <https://doi.org/10.1080/00207721.2016.1160455>
- Paz, A. J. C. (2011). Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado (2nd ed.). Retrieved from [https://www.academia.edu/38613942/Sistemas\\_Automáticos\\_de\\_Control\\_Fundamentos\\_Básicos\\_de\\_Análisis\\_y\\_Modelado](https://www.academia.edu/38613942/Sistemas_Automáticos_de_Control_Fundamentos_Básicos_de_Análisis_y_Modelado)
- Peñaranda, C., Silva, W., & Gómez, E. (2014). Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de E3T-UIS. Pregrado, Dept. de Ings. Eléct. y Electrónica, Univ. Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Perez, M., Pérez, A., & Pérez, E. (2008). Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. Facultad de Ingeniería,

Departamento de Electrónica y Automática, Universidad Nacional de San Juan.

Polo, J. de V. M., & Hernández, J. E. R. (2018). SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PI Y PID PARA SISTEMAS DE PRIMER ORDEN USANDO ANÁLISIS DE FRECUENCIA. *Ingeniería Al Día*, 4(2), 4–28.

Quanser Innovate Educate. (2009a). Quanser Ingeniería Trainer para NI-ELVIS Manual del estudiante.

Quanser Innovate Educate. (2009b). Quanser Trainer Ingeniería para NI-ELVIS Guía Práctica de Control de QNET.

Ramos, A. I. M. (2018). Comparación de métodos de sintonización de un controlador PID para procesos industriales. UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA.

Raza, A., Pathak, N., & Anwar, M. N. (2017). A PID controller tuning rule for FOPDT process to achieve better load disturbance rejection based on maximum sensitivity. 2017 International Conference on Smart Grids, Power and Advanced Control Engineering (ICSPACE), 149–154. <https://doi.org/10.1109/ICSPACE.2017.8343421>

Ribić, A. I., & Mataušek, M. R. (2012). A new predictive PI controller with additional filtering. 2(PART 1), 489–494. Retrieved from <https://www2.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84880869511&partnerID=40&md5=7255d1e26c3ff4f9a127d16d4b614b6a>

Ruíz, V. M. A. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Revista Ingeniería*, 12(1–2), 21–36.

Samygina, E. K., Rassudov, L. N., & Balkovoi, A. P. (2018). Comparison of linear position and velocity control strategies for a direct servodrive. 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), 1–

## 5. IEEE.

- Santos, S. O. (2018). Sintonización de un controlador PID basado en un algoritmo heurístico para el control de un Ball and Beam.
- Sarić, R., Čustović, E., Jokić, D., & Jurić, Ž. (2019). Validation of Novel System Identification Approach Based on Forced Oscillations Using Open-Loop Experiment. *Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 83, pp. 365–375.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-24986-1\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24986-1_29)
- Schermann, P. S., & García-Gabín, W. (2006). 2.22 Process Gains, Time Lags, Reaction Curves. *Instrument Engineers' Handbook: Process Control and Optimization*, 296.
- Shinskey, F. G. (1996). *Sistemas de control de procesos*. Tomo I. McGraw-Hill, México.
- Smith, C. A., Corripio, A. B., & Basurto, S. D. M. (1991). *Control automático de procesos: teoría y práctica*. Limusa.
- Tacconi, E., Mantz, R., Solsona, J., & Puleston, P. (2005). *Controladores Basados en Estrategias PID*. LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP.
- The MathWorks, I. (2019). Descripción del producto MATLAB. Retrieved from [https://la.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html)
- Torres Capuz, J. L., Martinez, C., & Ximena, S. (2015). Diseño e implementación de un sistema de control en una planta de llenado de tanques a escala usando un transmisor de nivel y algoritmo PID para pruebas en el laboratorio de automatización industrial.
- Villajulca, J. C. (2019a). Introducción a la sintonización de controladores: conociendo a los procesos PRIMERO!!! Retrieved from <https://instrumentacionycontrol.net/introduccion-a-la-sintonizacion-de-controladores-conociendo-a-los-procesos-primero/>



Villajulca, J. C. (2019b). Procesos integrativos: practicamente solo PROPORCIONAL.

Retrieved from <https://instrumentacionycontrol.net/procesos-integrativos-practicamente-solo-proporcional/>

Wang, Y.-G., & Cai, W.-J. (2002). Identification for integrating processes in the frequency domain. Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation (Cat. No. 02EX527), 4, 3344–3348. IEEE.